



**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PARAMETER  
PROSES TERHADAP KETINGGIAN KERAH PADA  
PROSES *INCREMENTAL BACKWARD HOLE-  
FLANGING* DENGAN BENDA KERJA PELAT  
ALUMINIUM**

**MUHAMMAD FAKHRUDDIN**  
**NRP 2113 106 010**

Dosen Pembimbing  
Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.  
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2016**



**FINAL PROJECT - TM 141585**

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF  
PROCESS PARAMETERS TOWARDS COLLAR  
HEIGHT ON INCREMENTAL BACKWARD HOLE-  
FLANGING PROCESS WITH ALUMINIUM PLATE  
WORKPIECE**

**MUHAMMAD FAKHRUDDIN**  
**NRP 2113 106 010**

**Advisor**

**Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.**

**Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2016**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PARAMETER  
PROSES TERHADAP KETINGGIAN KERAH PADA  
PROSES *INCREMENTAL BACKWARD HOLE-FLANGING*  
DENGAN BENDA KERJA PELAT ALUMINIUM**

**TUGAS AKHIR**


**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada Bidang Studi Teknik Manufaktur  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**Muhammad Fakhruddin  
NRP. 2113 106 010**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Hari Subiyanto M.Sc.  
(NIP. 196006231988031002)



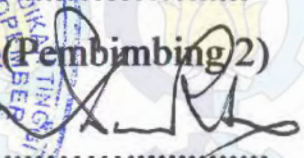
(Pembimbing 1)

2. Ir. Bobby Oedy P Soepangkat M.Sc., Ph.D.  
(NIP. 195305161978031001)



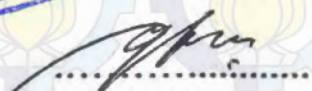
(Pembimbing 2)

3. Ir. Winarto DEA.  
(NIP. 196012131988111001)



(Penguji 1)

4. Ir. Nur Husodo M.Sc  
(NIP. 196104211987011001 )



(Penguji 2)

**SURABAYA  
Januari, 2016**



# **STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PARAMETER PROSES TERHADAP KETINGGIAN KERAH PADA PROSES INCREMENTAL BACKWARD HOLE- FLANGING DENGAN BENDA KERJA PELAT ALUMINIUM**

**Nama Mahasiswa** : Muhammad Fakhruddin  
**NRP** : 2113 106 010  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Pembimbing** : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.  
**Co-Pembimbing** : Ir. Bobby O. P. S, M.Sc, Ph.D.

## **ABSTRAK**

*Penambahan luasan di seputar lubang umum dilakukan melalui proses hole-flanging konvensional. Salah satu metode hole-flanging yang dikembangkan adalah incremental sheet forming (ISF). Metode ini digunakan untuk pembentukan pada lembaran logam dengan profil yang kompleks dan dengan dies yang sederhana. ISF yang umumnya ke arah forward belum mampu memecahkan persoalan dimana suatu lubang perlu dibentuk dengan kerah yang mengarah keluar (backward) dan pada produk yang hampir semua permukaannya tertutup. Pengembangan dari incremental sheet forming dilakukan dengan arah backward. Proses hole-flanging ini dinamakan proses incremental backward hole-flanging (IBHF).*

*Suatu penelitian dilakukan untuk mengamati pengaruh dari beberapa parameter proses terhadap ketinggian kerah yang dihasilkan pada proses IBHF. Percobaan dilakukan menggunakan mesin CNC, pahat berbentuk konis dengan sudut 30°, dan pelat dengan bahan aluminium. Parameter proses yang divariasikan adalah kecepatan makan dengan 2 level (400 <sup>mm</sup>/menit dan 700*

*mm/menit), langkah pembentukan arah radial dengan 3 level (1 mm, 1.25 mm, dan 2 mm), dan langkah pembentukan arah aksial dengan 3 level (2 mm, 2.75 mm, dan 3.5 mm). Beberapa parameter yang dikonstantakan meliputi, kecepatan putaran spindle (50 rpm), diameter lubang awal pembentukan (20 mm), diameter lubang akhir pembentukan (40 mm), dan diameter pahat konis yang digunakan (19 mm). Ketinggian kerah yang dihasilkan kemudian diukur dengan menggunakan digimatic caliper.*

*Pada penelitian ini ditunjukkan bahwa kecepatan makan ( $v_f$ ) tidak mempengaruhi ketinggian kerah. Peningkatan besar langkah pembentukan ke arah radial ( $x/y$ ) akan meningkatkan nilai ketinggian kerah dan semakin besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $z$ ) akan menurunkan nilai ketinggian kerah pada proses IBHF.*

***Kata kunci: hole-flanging, incremental sheet metal forming, incremental backward***

# **EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS TOWARDS COLLAR HEIGHT ON INCREMENTAL BACKWARD HOLE- FLANGING PROCESS WITH ALUMINIUM PLATE WORKPIECE**

**Student Name** : Muhammad Fakhruddin  
**NRP** : 2113 106 010  
**Department** : Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Advisor** : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.  
**Co-Advisor** : Ir. Bobby O. P. S, M.Sc, Ph.D.

## **ABSTRACT**

*The addition an area around the hole, typically done through conventional hole-flanging process. The development of hole-flanging process is incremental sheet forming (ISF). This method is used to form sheet metal with complex profile and using simple dies. ISF movement is typically inner-forward. This kind of movement is unable to solve problems where a hole and collar needs to be formed outwardly (backward). Later, development of incremental sheet forming done in the backward direction. This kind of process is called incremental backward (IBHF).*

*A research was conducted to investigate the effect of process parameters toward collar height which is produced by IBHF. Experiments were performed with a CNC machine, 30° conical shaping tool, and aluminium plates. The process parameters are feed speed with two levels (400  $\text{mm}/\text{min}$  and 700  $\text{mm}/\text{min}$ ), radial forming step size with three levels (1 mm, 1.25 mm, and 2 mm), and axial forming step size with three levels (2 mm, 2.75 mm, and 3.5 mm). Some parameters were fixed, i.e., spindle speed (50 rpm), initial hole diameter (20 mm), final hole diameter (40 mm), and*



*conical shaping tool diameter (19 mm). Collar height then measured with digimatic calliper.*

*Experimental results of IBHF process have shown that the feed speed ( $v_f$ ) doesn't affect collar height. Increasing the radial forming step size ( $x/y$ ) also increase the collar height. Increasing the axial forming step size ( $z$ ) will reduce the collar height.*

**Keyword:** *hole-flanging, incremental sheet metal forming, incremental backward.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat ALLAH SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis diberi kesempatan untuk dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir dengan judul **“STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PARAMETER PROSES TERHADAP KETINGGIAN KERAH PADA PROSES INCREMENTAL BACKWARD HOLE-FLANGING DENGAN BENDA KERJA PELAT ALUMINIUM”** disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala bantuan dan dorongan serta dedikasinya yang telah membantu penyusunan Tugas Akhir ini hingga selesai. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Ayahku Imam Mashudi, Ibuku Yetti Indrawati, Mbak Nuha Nadhiroh, Adik kecilku Afifah Zuhroh, Mbah Juanah, dan segenap Keluarga penulis yang telah memberikan segalanya bagi penulis.
2. Bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. sebagai dosen pembimbing pertama.
3. Bapak Ir. Bobby O.P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D. sebagai dosen pembimbing kedua.
4. Bapak Ir. Nur Husodo, M.Sc. dan Bapak Ir. Winarto, DEA. sebagai dosen penguji Tugas Akhir.
5. Bapak Ary Bachtiar K.P., S.T., M.T., Ph.D selaku dosen wali.
6. Seluruh staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin yang selalu memberi atmosfer kampus yang menyenangkan.
7. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Program Pascasarjana ITS.
8. Teman-teman Lab. Proses Manufaktur Teknik Mesin–ITS, Rozaq, Rizky, Mbak Novi, Adib, dan Bang Hanif.



9. Teman-teman yang telah memberi support bagi saya pribadi dan laboratorium Proses Manufaktur pada umumnya, Rae, Ucup, Sinta, Falah, Saifuddin, dan Wisnu.

10. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu-satu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangannya. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan khususnya di bidang proses manufaktur. Aamiin.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.2.1 Batasan Masalah .....	3
1.2.2 Asumsi Penelitian .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b>	<b>7</b>
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 Dasar Teori .....	8
2.2.1 Proses <i>Hole-Flanging</i> Konvensional .....	8
2.2.2 Proses <i>Metal Spinning</i> .....	12
2.2.3 <i>Incremental Sheet Metal Forming</i> (ISF).....	15
2.2.4 <i>Incremental Backward Hole-Flanging</i> (IBHF) .	16
2.2.5 <i>Strain Hardening</i> dan <i>Strain Hardening</i> <i>Exponent</i> .....	18
2.2.6 Efek Laju Deformasi .....	20
2.2.7 Model Eksperimen.....	23
2.2.8 Desain Eksperimen .....	23
2.2.9 Metode Faktorial.....	31
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>33</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	33
3.2 Pemilihan Parameter Respon dan Pengukurannya.	34
3.3 Pemilihan Parameter Proses.....	35
3.4 Rancangan Penelitian.....	37

3.5	Tempat Penelitian dan Peralatan yang Digunakan..	39
3.5.1	Mesin Frais CNC .....	39
3.5.2	<i>Digimatic Caliper</i> .....	40
3.5.3	Pahat Konis.....	41
3.5.4	<i>Jig</i> Penahan Pelat Aluminium.....	41
3.6	Prosedur Penelitian .....	42
<b>BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>45</b>
4.1	Pengaruh Parameter Kecepatan Makan, Besar Langkah Pembentukan ke Arah Radial, dan Besar Langkah Pembentukan ke Arah Aksial.....	45
4.1.1	Uji Identik.....	50
4.1.2	Uji Independen.....	50
4.1.3	Uji Kenormalan.....	51
4.2	Pengaruh Parameter Proses Terhadap Ketinggian Kerah.....	54
4.2.1	Pengaruh Besar Langkah Pembentukan ke Arah Aksial ( $\Delta z$ ) terhadap Ketinggian Kerah (h) .....	54
4.2.2	Pengaruh Besar Langkah Pembentukan ke Arah Radial ( $\Delta^x/y$ ) terhadap Ketinggian Kerah (h) .....	57
4.3	Perbedaan Ketinggian Kerah Hasil Proses dengan Ketinggian Kerah Hasil Perhitungan Asumsi Volume Konstan .....	61
<b>BAB V KEIMPULAN DAN SARAN.....</b>		<b>65</b>
5.1	Kesimpulan .....	65
5.2	Saran .....	65

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 a) <i>assymetrical hole</i> dan b) <i>symmetrical hole</i> (Petek dan Kuzman, 2012).....	1
Gambar 2.1 Diagram skematik dari proses <i>hole-flanging</i> konvensional (Lange, 1985). ....	8
Gambar 2.2 Proses <i>hole-flanging</i> (Krichen dkk., 2011).....	10
Gambar 2.3 <i>Collar drawing ratio</i> ( $\beta_{\max} = d_1/d_0$ ) sebagai fungsi dari <i>relative hole diameter</i> ( $d_0/s_0$ ). (a) Material-St 14 (AISI 1005). (b) Material-Al 99.5w (AA 1050-O) (Lange, 1985).....	11
Gambar 2.4 Proses <i>manual spinning</i> (ASM Handbook, 2006). ..	12
Gambar 2.5 Bentuk-bentuk yang dapat dibuat melalui proses <i>manual spinning</i> (ASM Handbook, 2006).....	13
Gambar 2.6 <i>Power spinning</i> (ASM Handbook, 2006). ....	14
Gambar 2.7 Proses <i>incremental sheet metal forming</i> (ISF) a) <i>deep drawing</i> dan b) <i>hole-flanging</i> (Kopac dan Kampus, 2006). ....	16
Gambar 2.8 Proses <i>incremental backward hole-flanging</i> (IBHF) (Petek dan Kuzman, 2012).....	17
Gambar 2.9 Diagram tegangan-regangan yang didapatkan dengan <i>unloading</i> dan <i>reloading</i> (DeGarmo, 1997).....	18
Gambar 2.10 Kurva <i>true stress-true strain</i> untuk logam dengan <i>strain hardening</i> yang besar dan kecil (DeGarmo, 1997). ....	20
Gambar 2.11 Efek dari laju regangan pada kekuatan tarik <i>ultimate</i> untuk aluminium (Kalpakjian, 2009). ....	22
Gambar 2.12 Model umum dari proses atau sistem (Montgomery, 1991). ....	23
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian. ....	33
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian (lanjutan). ....	34
Gambar 3.2 Parameter respon proses IBHF. ....	35
Gambar 3.3 Pengukuran ketinggian kerah. ....	35
Gambar 3.4 Proses IBHF menggunakan mesin frais CNC Dahlih MCV 1020 BA. ....	39

Gambar 3.5 <i>Digimatic caliper</i> Mitutoyo .....	40
Gambar 3.6 Profil pahat konis.....	41
Gambar 3.7 <i>Jig</i> yang digunakan untuk menahan pelat aluminium.....	41
Gambar 3.8 Kondisi benda kerja, a) sebelum dan b) sesudah dicekam dengan <i>jig</i> penahan pelat. ....	42
Gambar 3.9 Pelat aluminium dilubangi dengan pahat <i>end mill</i> ..	43
Gambar 3.10 Skema pembentukan melalui proses IBHF.....	43
Gambar 3.11 Pengukuran ketinggian kerah ( $h$ ).....	44
Gambar 4.1 Grafik <i>residual</i> ketinggian kerah <i>versus order</i> . ....	50
Gambar 4.2 Grafik ACF pada respon ketinggian kerah. ....	51
Gambar 4.3 Grafik uji distribusi normal terhadap <i>residual</i> pada respon ketinggian kerah. ....	52
Gambar 4.4 Grafik pengaruh kecepatan makan ( $v_f$ ), besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x_y$ ), dan besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) terhadap ketinggian kerah.....	53
Gambar 4.5 Grafik ( $\Delta z$ ) vs ( $h$ ) pada kecepatan makan a) 400 mm/min dan b) 700 mm/min .....	54
Gambar 4.5 Grafik ( $\Delta z$ ) vs ( $h$ ) pada kecepatan makan a) 400 mm/min dan b) 700 mm/min (lanjutan).....	55
Gambar 4.6 Grafik ( $\Delta x_y$ ) vs ( $h$ ) pada kecepatan makan a) 400 mm/min dan b) 700 mm/min .....	58
Gambar 4.6 Daerah yang dibatasi selama proses IBHF .....	61
Gambar 4.7 Estimasi ketinggian kerah dengan asumsi volume konstan .....	62

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rasio maksimum ( $\beta_{\max}$ ) pada proses <i>power spinning</i> untuk beberapa material (ASM Handbook, 2006)..	15
Tabel 2.2	<i>Range</i> dari regangan dan laju deformasi yang umum digunakan pada proses manufaktur (Kalpakjian, 2009).	21
Tabel 2.2	Tabel analisis variansi (ANOVA)	27
Tabel 2.3	Susunan data rancangan faktorial tiga parameter.	32
Tabel 3.1	Faktor-faktor yang ditentukan dan dikonstankan....	36
Tabel 3.2	Sifat fisik dan mekanik pelat aluminium 1050 A.	37
Tabel 3.3	Isian rancangan eksperimen.	38
Tabel 3.4	Spesifikasi dari mesin frais CNC Dahlih MCV 1020 BA	40
Tabel 4.1	Data ketinggian kerah hasil eksperimen.	45
Tabel 4.2	Analisis variansi (ANOVA) parameter proses terhadap ketinggian kerah.	47
Tabel 4.3	Kondisi hipotesis nol pada respon ketinggian.	48
Tabel 4.4	Hasil uji Tukey pada $v_f$ untuk respon ketinggian kerah.	48
Tabel 4.5	Hasil uji Tukey pada $\Delta^x/y$ untuk respon ketinggian kerah.	49
Tabel 4.6	Hasil uji Tukey pada $\Delta z$ untuk respon ketinggian kerah.	49
Tabel 4.7	Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter, $v_f = 400$ mm/min, $\Delta^x/y = 2$ mm, dan $\Delta z = 2$ mm	56
Tabel 4.8	Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter, $v_f = 400$ mm/min, $\Delta^x/y = 2$ mm, dan $\Delta z = 2.75$ mm	56
Tabel 4.9	Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter, $v_f = 400$ mm/min, $\Delta^x/y = 2$ mm, dan $\Delta z = 3.5$ mm	57
Tabel 4.10	Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter, $v_f = 400$ mm/min, $\Delta^x/y = 1$ mm, dan $\Delta z = 2$ mm	59
Tabel 4.11	Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter, $v_f = 400$ mm/min, $\Delta^x/y = 1.25$ mm, dan $\Delta z = 2$ mm	60
Tabel 4.12	Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter, $v_f = 400$ mm/min, $\Delta^x/y = 2$ mm, dan $\Delta z = 2$ mm	60





**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada industri otomotif, pembentukan bagian-bagian yang terbuat dari lembaran logam, (*sheet metal forming*) merupakan proses yang sangat penting. Proses ini sangat penting terutama untuk pembuatan prototip atau komponen tertentu dalam jumlah kecil. Beberapa komponen atau prototip tersebut memiliki profil yang rumit. Profil yang rumit pada komponen tersebut menyebabkan pembuatannya memerlukan langkah pembentukan yang banyak dan pada beberapa kasus, alat yang digunakan untuk melakukan pembentukan bisa sangat besar. Pada Gambar 1.1(a), ditunjukkan lubang dengan kerah dengan bentuk yang asimetris hasil proses *hole-flanging* konvensional dengan bentuk cetakan yang rumit. Metode ini tidak efektif dengan seiring meningkatnya kompleksitas dari lubang yang diinginkan, sehingga bentuk *tool* dan cetakan (*dies*) akan semakin kompleks dan untuk produksi dalam jumlah kecil, biaya produksinya akan semakin mahal.



(a)



(b)

Gambar 1.1 a) *assymetrical hole* dan b) *symmetrical hole* (Petek dan Kuzman, 2012).

Pada industri otomotif seringkali dilakukan proses penyambungan pipa. Proses penyambungan pipa banyak dilakukan dengan menggunakan pengikatan oleh lembaran pelat yang

berbentuk lubang dan kerah yang sesuai dengan profil pipa. Pada Gambar 1.1(b), ditunjukkan proses pembuatan lubang dengan kerah, umum dilakukan melalui proses *hole-flanging* konvensional. Proses ini sangat cocok untuk memproduksi lubang dengan profil yang sederhana secara massal. Pembentukan kerah pada profil lubang yang kompleks dengan jumlah produksi yang sedikit menjadikan proses *hole-flanging* konvensional ini biayanya sangat mahal. Desain *punch* dan *dies* yang kompleks diperlukan pada proses *hole-flanging* konvensional. Oleh karena itu, solusi diperlukan untuk pembentukan pelat logam dengan profil lubang dan kerah yang kompleks dengan biaya produksi yang minimal pada volume produksi yang kecil. Salah satu metode *hole-flanging* yang dikembangkan adalah *incremental sheet forming* (ISF). Metode ini digunakan untuk pembentukan pada lembaran logam dengan profil lubang yang kompleks. Pada metode ini digunakan *dies* yang sederhana atau bahkan tanpa *dies*. *Punch* yang umum digunakan adalah pahat berbentuk bulat dan alur gerak pembentukan lubang dan kerahnya menggunakan bantuan mesin CNC atau robot. Suatu lubang dengan kerah yang mengarah keluar dan pada produk yang hampir semua permukaan kerjanya tertutup, belum mampu dikerjakan dengan proses ISF. Oleh karena itu, pengembangan dari ISF dilakukan dengan pembentukan lubang dengan kerah ke arah keluar (*backward*). Metode yang dikembangkan untuk membentuk lubang dengan kerah yang mengarah keluar disebut *incremental backward hole-flanging* (IBHF).

Petek dan Kuzman (2012) melakukan penelitian pada proses IBHF dengan parameter respon ketinggian dan ketebalan kerah. Hasil penelitiannya adalah parameter proses mempengaruhi ketinggian dan ketebalan kerah hasil proses IBHF. Parameter-parameter proses tersebut meliputi geometri pahat, kecepatan makan ( $v_f$ ), pola dari gerak makan ke arah sumbu radial ( $\Delta x_y$ ), dan sumbu aksial ( $\Delta z$ ).



Berdasarkan hal-hal yang telah dipaparkan, maka akan dilakukan studi eksperimen tentang pembuatan lubang dengan kerah melalui proses IBHF. Studi yang akan dilakukan ini difokuskan pada bagaimana pengaruh parameter-parameter proses yang berupa kecepatan makan, langkah pembentukan ke arah radial, dan langkah pembentukan ke arah aksial terhadap ketinggian kerah terhadap hasil proses IBHF. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pelat aluminium dan pahat bentuk konis.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang, maka permasalahan yang dapat dirumuskan dalam Tugas Akhir ini adalah apakah parameter-parameter proses yang berupa:

1. Kecepatan makan ( $v_f$ ).
2. Besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x/y$ ).
3. Besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ).

mempengaruhi ketinggian kerah ( $h$ ) hasil proses IBHF.

### 1.2.1 Batasan Masalah

Dengan tujuan untuk memusatkan pembahasan pada permasalahan yang sesungguhnya, maka diberlakukan beberapa batasan-batasan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Parameter IBHF yang diatur adalah kecepatan makan ( $v_f$ ), besar langkah pembentukan arah radial ( $\Delta x/y$ ), dan besar langkah pembentukan arah aksial ( $\Delta z$ ).
2. Tidak terjadi interaksi pada masing-masing parameter.
3. Mesin yang digunakan adalah mesin CNC DAHLIY MCV 1020 BA.
4. Sumbu standar mesin yang digunakan sesuai dengan sumbu proses frais tegak.
5. Putaran spindel dikonstantkan sebesar 50 rpm.
6. Pahat IBHF terbuat dari bahan *high speed steel* (HSS) dengan diameter sebesar 19 mm dan sudut konis sebesar 30°.

7. Pelat dari bahan aluminium 1050A dengan dimensi 70 mm x 70 mm x 1 mm.
8. Diameter awal lubang sebesar 20 mm dan diameter akhir lubang sebesar 40 mm.
9. Proses pembentukan terjadi pada daerah diameter awal pembentukan, hingga diameter akhir pembentukan (20 mm-40 mm) dengan volume konstan.

### **1.2.2 Asumsi Penelitian**

1. Faktor-faktor yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Material benda kerja maupun pahat memiliki komposisi kimia dan mekanik yang homogen.
3. Mesin dan operator bekerja dalam kondisi baik selama proses pemesinan.
4. Alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak dan terkalibrasi.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Dalam melakukan penelitian ini ada tujuan yang ingin dicapai, yaitu mengidentifikasi pengaruh parameter-parameter proses yang berupa:

1. Kecepatan makan ( $v_f$ ).
2. Besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta^*r$ ).
3. Besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ).

terhadap ketinggian kerah ( $h$ ) hasil proses IBHF.

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1 Sebagai bahan referensi bagi penelitian selanjutnya dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang pengaruh kecepatan makan ( $v_f$ ), besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ), dan besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta^x/y$ ) pada proses *incremental backward hole-flanging* (IBHF) terhadap tinggi kerah ( $h$ ) yang dihasilkan.
- 2 Membantu industri otomotif dan manufaktur dalam menentukan parameter pembentukan dengan menggunakan teknologi proses *multi-step (incremental) sheet metal forming*.



**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

### 2.1 Tinjauan Pustaka

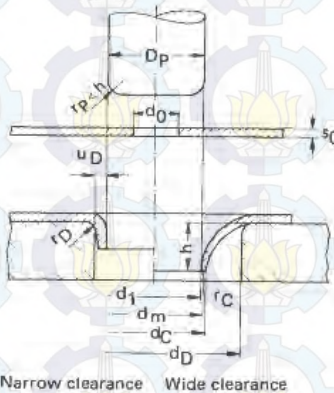
Proses pembentukan pelat logam atau disebut *sheet metal forming* banyak digunakan dalam industri manufaktur dan otomotif. Semakin tinggi tingkat kerumitan dari profil yang akan dibentuk, semakin mahal biaya produksinya. *Punch* dan *dies* yang digunakan semakin rumit bentuknya atau semakin panjang prosesnya. Salah satu proses pembentukan logam yang dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah *incremental backward hole-flanging* (IBHF). IBHF adalah suatu proses pelebaran lubang yang disertai dengan pembentukan kerah. Sebagai *punch* adalah pahat CNC yang berbentuk bulat maupun berbentuk konis. Gerakan, langkah makan, jumlah makan, dan parameter lainnya di kendalikan oleh *toolpath* yang telah didesain pada *software* CAD atau CAM.

Petek dan Kuzman (2012) melakukan penelitian pada proses *incremental backward hole-flanging* dengan parameter respon ketinggian dan ketebalan kerah. Material pelat yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja DC 05. Diameter lubang awal pembentukan adalah sebesar 24 mm yang dihasilkan dari proses *milling* dan diameter lubang akhir pembentukan sebesar 80 mm. Parameter-parameter proses yang digunakan adalah diameter pahat (18 mm, 20 mm, 22 mm, 24 mm, dan 26 mm), langkah pembentukan radial (1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm, dan 3 mm), langkah pembentukan aksial (0.1 mm, 0.65 mm, 1.2 mm, 1.75 mm, dan 2.3 mm), dan kecepatan makan (1200 mm/menit, 2900 mm/menit, 4600 mm/menit, 6300 mm/menit, dan 8000 mm/menit). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa parameter yang berpengaruh paling signifikan terhadap ketinggian dan ketebalan kerah adalah diameter pahat, besar langkah pembentukan radial, dan besar langkah pembentukan arah aksial.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Proses *Hole-Flanging* Konvensional

*Hole-flanging* konvensional adalah bagian dari proses pembentukan (*forming*) dengan menggunakan kombinasi tekan dan tarik. Proses *hole-flanging* atau proses pembentukan kerah di sekitar lubang, adalah salah satu proses pembentukan pada pelat logam. Pelat logam dilubangi, kemudian ditekan perlahan dengan *punch* berbentuk plunyer atau berbentuk konis. Pelat ditahan oleh tumpuan pembentuk atau *dies*, untuk menghasilkan kerah di sekitar lubang.



Gambar 2.1 Diagram skematik dari proses *hole-flanging* konvensional (Lange, 1985).

Pada Gambar 2.1, apabila lubang akhir ( $d_1$ ) relatif besar ( $d_1 > 5s_0$ ), *clearance* pada *die* kecil ( $u_D \leq s_0$ ), dan radius *die* kecil, maka tinggi kerah ( $h$ ) dapat diestimasikan secara cukup akurat dengan menggunakan rumus (2.1) (Lange, 1985) berikut.

$$h = \frac{d_L - d_C}{2} \quad (2.1)$$



Namun, apabila radius atau *clearance* pada *die* itu besar, digunakan rumus (2.2) (Lange, 1985) berikut.

$$h = \frac{d_m - d_c}{z} + 0.43r_D + 0.72s_c \quad (2.2)$$

Rumus di atas tidak untuk digunakan untuk kerah dengan diameter relatif kecil ( $d_1 < 5s_0$ ). Untuk situasi tersebut, ketinggian kerah secara teoritis ( $h_{th}$ ) dapat dihitung dengan menggunakan rumus (2.3) (Lange, 1985), dengan asumsi volume konstan.

$$h_{th} = s_c \frac{d_c^2 - d_1^2}{d_c^2 - d_1^2} \quad (2.3)$$

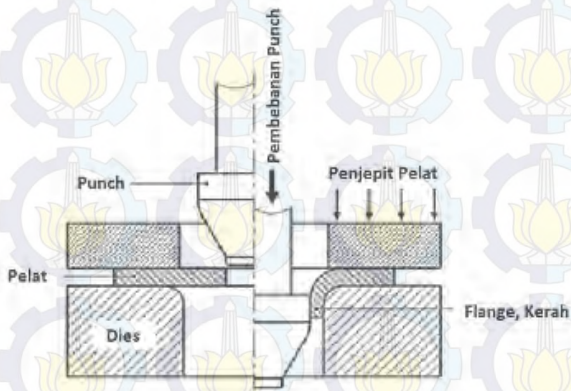
Karena adanya faktor koreksi ( $c$ ), maka tinggi aktual dari kerah lebih besar dari tinggi kerah teoritis, seperti ditunjukkan pada rumus (2.4) (Lange, 1985).

$$h = c \times h_{th} \quad (2.4)$$

Besarnya nilai ( $c$ ) berkisar antara 1 hingga 1.6. Faktor koreksi ( $c$ ) dapat diestimasi dari persamaan (2.5) (Lange, 1985) berikut:

$$c = 1 + \frac{1}{1} \left[ 2.5 \left( 2.5 - \frac{z_{sc}}{d_c - d_1} \right)^2 + \left( 2.5 - \frac{z_{sc}}{d_c - d_1} \right) \right] \quad (2.5)$$

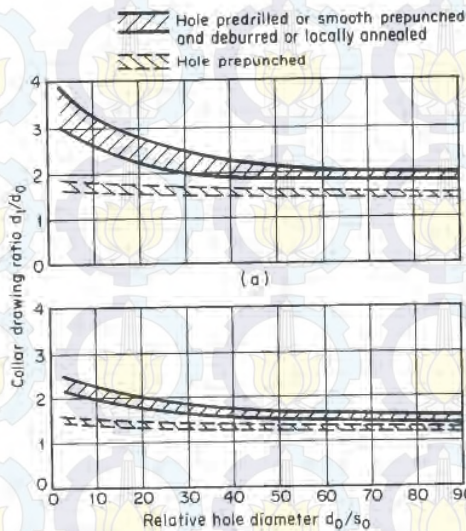
Persamaan (2.5) didapatkan dari hasil percobaan dengan menggunakan pelat baja St 13 (AISI 1006) yang memiliki ketebalan 1-2 mm. Nilai ( $c$ ) disarankan untuk dinaikkan apabila digunakan material yang lebih lunak dan sedikit dikurangi apabila digunakan material yang lebih keras (maksimum  $\pm 20\%$ ) (Lange, 1985). Proses *hole-flanging* konvensional dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Proses *hole-flanging* (Krichen dkk., 2011).

Selama proses pembentukan, benda kerja dapat mengalami *necking*, retak, maupun sobek. Beberapa peneliti telah menemukan hubungan linier antara diameter lubang akhir dengan diameter lubang awal pembentukan. Batas pembentukan saat proses *hole-flanging* juga dipengaruhi oleh material benda kerja, teknik pembentukan, teknik pencekaman, pelumasan, parameter proses pembentukan, dan geometri alat yang digunakan. Beberapa hal yang berpengaruh pada saat proses *hole-flanging* antara lain spesifikasi material, ketebalan material, dan kualitas dari lubang awal pembentukan. Salah satu penelitian menyebutkan bahwa semakin baik kualitas dari lubang awal pembentukan semakin meningkatkan kualitas bentuk kerah dan *hole-flangeability*-nya, hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Krichen dkk., 2011).





Gambar 2.3 Collar drawing ratio ( $\beta_{\max} = d_1/d_0$ ) sebagai fungsi dari *relative hole diameter* ( $d_0/s_0$ ). (a) Material-St 14 (AISI 1005). (b) Material-Al 99.5w (AA 1050-O) (Lange, 1985).

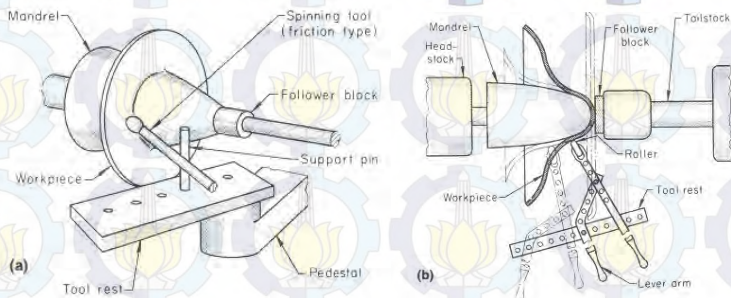
Pada Gambar 2.3, ditunjukkan hubungan antara diameter lubang akhir pembentukan ( $d_1$ ) dan lubang awal pembentukan ( $d_0$ ). Proses pembuatan lubang awal berpengaruh pada rasio pembentukan kerah. Lubang awal hasil proses gurdi memiliki batas rasio pembentukan yang lebih tinggi daripada lubang awal yang dihasilkan dengan cara *di-piercing*. Hal ini disebabkan material mengalami pengerasan pada saat proses *piercing*. Pembuatan lubang awal menggunakan proses *piercing* menyebabkan kegagalan pada keliling kerah terjadi lebih awal. Selain itu, *burr* dan patahan pada permukaan setelah di *piercing* cenderung menjadi penyebab awal retakan (Lange, 1985).



### 2.2.2 Proses *Metal Spinning*

*Metal spinning* adalah proses pembentukan pada pelat menjadi bentuk yang simetris dengan sumbu aksialnya dengan memadukan gerak rotasi dan gaya pembentukan. *Metal spinning* meliputi pembentukan dari komponen yang *axially symmetric* pada *mandrel* yang berputar menggunakan *roller*. Ada 3 macam teknik dari *metal spinning*, yaitu *manual spinning*, *power spinning*, dan *tube-spinning*. Peralatan untuk melakukan *metal spinning* umumnya menggunakan peralatan yang sama pada mesin bubut, dengan beberapa modifikasi untuk menyesuaikan komponen yang akan dibentuk. Pembentukan awal (*preform*) umumnya dilakukan untuk mengurangi tegangan saat pembentukan. *Metal spinning* dapat digunakan untuk menghasilkan komponen dengan jumlah kecil maupun dalam jumlah besar dengan biaya yang rendah (ASM Handbook, 2006).

Pada proses *manual spinning*, pelat berbentuk lingkaran ditekan melawan *mandrel* yang berputar dengan alat penekan. Alat penekan bergerak secara manual atau secara hidrolis melewati *mandrel* untuk membentuk pelat logam, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Proses *manual spinning* (ASM Handbook, 2006).

Proses *manual metal spinning* umumnya dilakukan pada temperatur ruangan. Akan tetapi, kenaikan temperatur pada saat proses *manual metal spinning* digunakan untuk membantu pembentukan pada pelat yang tebal atau pada logam paduan dengan kekerasan rendah. Beberapa bentuk yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut adalah produk yang dapat dibentuk melalui proses *metal spinning*.



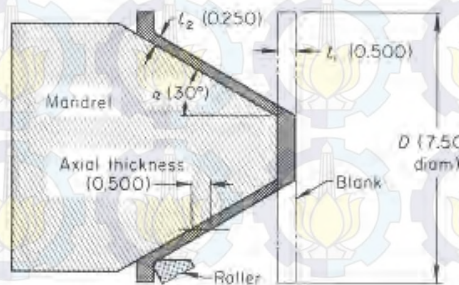
Gambar 2.5 Bentuk-bentuk yang dapat dibuat melalui proses *manual spinning* (ASM Handbook, 2006).

Secara ekonomis bentuk-bentuk tersebut relatif susah dibentuk menggunakan teknik lain. *Manual spinning* adalah satu-satunya cara untuk menghasilkan komponen dengan bentuk tersebut pada jumlah kecil dengan nilai ekonomis tinggi. *Manual metal spinning* lebih efisien digunakan untuk menghasilkan komponen kurang dari 1000. Jumlah yang lebih besar diproduksi dengan menggunakan *power spinning* atau *press forming* untuk biaya yang lebih rendah.

*Power spinning* untuk baja dan logam paduan juga dapat disebut *shear spinning*. Ada dua aplikasi dalam menghasilkan produk dengan jumlah yang besar menggunakan metode ini, yaitu *metal cone spinning* dan *metal tube spinning*. *Power spinning* juga dapat menghasilkan bentuk *hemispheres*, dengan bentuk sesuai dengan desain yang diinginkan.



Hampir semua logam yang lunak (*ductile*) dapat dibentuk dengan menggunakan *power spinning*. Komponen kecil dengan jumlah banyak hingga komponen untuk pesawat ruang angkasa dengan jumlah kecil dapat dikerjakan dengan menggunakan *power spinning*. Aplikasi paling umum yang dapat dikerjakan dengan menggunakan proses *power spinning* adalah bentuk-bentuk konis. Secara volumetris, pelat logam didorong pada arah aksial. Hubungan antara ketebalan awal dari pelat ( $t_1$ ), dan ketebalan dari produk jadi ( $t_2$ ) adalah  $t_2 = t_1 \times \sin \alpha$ , dimana sudut ( $\alpha$ ) merupakan sudut dari ujung konis. Pada *power spinning* diameter dari komponen akhir, sama dengan diameter awal pelat. Skema *power spinning* ditunjukkan pada Gambar 2.6 berikut (ASM Handbook, 2006).



Gambar 2.6 *Power spinning* (ASM Handbook, 2006).

Rasio pembentukan ( $\beta$ ) pada *power spinning* dapat dihitung dari diameter pelat ( $d_0$ ) dan *mandrel* yang digunakan saat proses *spinning* ( $d_1$ ), yaitu  $\beta = d_0/d_1$ . Tergantung dari material yang dibentuk, rasio pembentukan maksimum pada proses *metal spinning* dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.



Tabel 2.1 Rasio maksimum ( $\beta_{\max}$ ) pada proses *power spinning* untuk beberapa material (ASM Handbook, 2006).

Material	$\beta_{\max}$	Material	$\beta_{\max}$
Structural steel sheet	1.40	Al and Al alloys	1.55
Deep drawing steel sheet	2.00	Cu and Cu alloys	2.00
High-alloy steel sheet	1.27	Ni	1.27

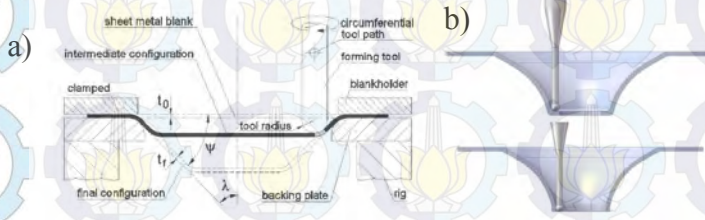
### 2.2.3 Incremental Sheet Metal Forming (ISF)

*Sheet metal forming* konvensional membutuhkan *punch* dan *dies* yang khusus untuk mendapatkan bentuk tertentu. Berbeda dengan *sheet metal forming* konvensional, pada proses ISF pahat berbentuk bulat digunakan untuk proses pembentukan. Alur gerakan pembentukan dikontrol dengan pemrograman pada mesin CNC dengan langkah yang kecil dan berulang. Proses ISF mirip dengan proses *metal spinning*.

Beberapa parameter yang berpengaruh pada proses ISF, kurang lebih sama dengan proses *sheet metal forming* konvensional. Namun dilihat dari alat yang digunakan, pahat dengan bentuk bulat lebih efektif dalam segi *formability*-nya. Pada prosesnya, sedikit gesekan pada permukaan pelat juga mampu menaikkan *formability*-nya. Kecepatan makan mempengaruhi ketinggian dan ketebalan kerah, semakin rendah kecepatan makannya, semakin tinggi *formability*-nya. Namun kecepatan makan yang rendah menyebabkan waktu pembentukan yang semakin lama (Kim dan Park, 2002).

Pada Gambar 2.7, ditunjukkan metode ISF ini memiliki beberapa keuntungan, yaitu pembuatannya dapat secara langsung diperoleh dari file CAD atau CAM dan perubahan desain dapat dilakukan dengan mudah dan cepat. Selain itu, *dies* positif maupun negatif tidak diperlukan karena pembentukan sepenuhnya dilakukan oleh pahat berbentuk bulat yang gerakannya di kontrol *toolpath* dari CNC. *Formability* material meningkat karena material di regangkan pada langkah yang kecil dan berulang. Gaya

yang dibutuhkan relatif lebih kecil daripada menggunakan metode konvensional. Proses *incremental sheet metal forming* (ISF) mampu meningkatkan kualitas permukaan dan cocok untuk produk dengan volume produksi kecil (Kopac dan Kampus, 2005).



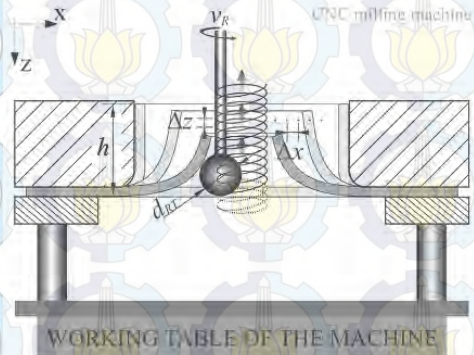
Gambar 2.7 Proses *incremental sheet metal forming* (ISF) a) *deep drawing* dan b) *hole-flanging* (Kopac dan Kampus, 2006).

#### 2.2.4 Incremental Backward Hole-Flanging (IBHF)

Pada umumnya, ISF adalah proses *sheet metal forming* yang arah pembentukannya maju ke dalam (*inner-forward*). Untuk pengerjaan produk yang memerlukan lubang dengan kerah menuju ke arah luar (*outward*) dan pada lingkup kerja yang tertutup, proses ISF arah maju ke dalam akan kesulitan dalam membentuknya. Oleh karena itu metode pembentukan lubang dengan kerah ke arah keluar diperlukan. Salah satu metode yang dikembangkan untuk mengatasi hal tersebut adalah proses IBHF. Bentuk dari kerah yang diinginkan merupakan hasil dari gerakan pembentukan yang dikontrol oleh mesin CNC dengan pahat berbentuk bulat maupun konis. Pelat logam yang akan dibentuk diletakkan pada sebuah *jig*, dimana *jig* tersebut menahan pelat pada saat proses pembentukan berlangsung. Lubang awal kemudian dibentuk dengan proses *milling* atau *drilling*. Diameter awal pada pelat logam yang akan dibentuk perlu diperhatikan besarnya, agar pahat dapat masuk ke dalam lubang awal. Kemudian, ujung pahat berbentuk konis



maupun bulat turun hingga ke pelat bagian bawah dan proses pembentukan dilakukan dari bawah menuju ke atas. Proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.8, dimana proses dan alat yang digunakan dalam proses *hole-flanging* kurang lebih sama dengan ISF.



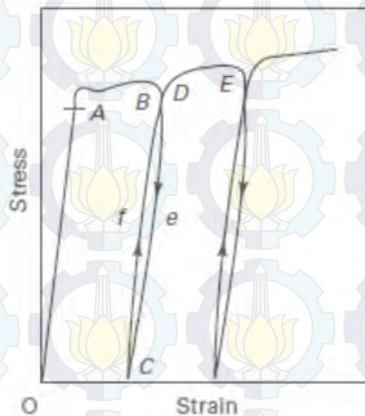
Gambar 2.8 Proses *incremental backward hole-flanging* (IBHF) (Petek dan Kuzman, 2012)

Gerakan pahat mengikuti *toolpath* yang telah diprogram untuk proses pembentukan. Secara bertahap, pahat bulat atau konis membentuk pelat dalam rangkaian *toolpath* hingga kerah dan diameter lubang akhir pembentukan yang diinginkan tercapai. Pada saat rangkaian pembentukan, *toolpath* diprogram agar sesuai dengan bentuk pahat, lubang awal pembentukan, dan langkah penambahan atau inkrementasi dari alur radial dan aksial. Pada Gambar 2.8 diatas,  $\Delta x$  dan  $\Delta z$  merupakan representasi dari besar penambahan alur pada arah radial atau arah sumbu X dan langkah pada arah aksial atau arah sumbu Z (Petek dan Kuzman, 2012).



### 2.2.5 Strain Hardening dan Strain Hardening Exponent

Diagram *true stress-true strain* pada gambar 2.9 menunjukkan sejauh mana logam bereaksi ketika diberi perlakuan *slow loading* dan *unloading*. *Loading* dan *unloading* pada daerah elastis akan menghasilkan siklus naik dan siklus turun yang linier terhadap kurva diantara titik O dan A. Namun, apabila pembebanan dilakukan hingga titik B (daerah plastis), maka *unloading* akan mengikuti alur BeC, dimana kurva ini memiliki *slope* yang hampir paralel dengan garis OA. Spesimen yang diberi beban hingga titik B akan mengalami perpanjangan permanen sebesar OC. Pada pembebanan ulang dari titik C, observasi elastisitas dilakukan kembali dimana tegangan mengikuti alur CfD, dimana kurva sedikit berbeda dengan kurva *unloading* BeC. Sekarang titik D adalah titik *yield* untuk material pada bagian yang terbentuk secara parsial. Perbandingan antara titik A dan titik D menunjukkan bahwa deformasi plastis telah membuat material semakin kuat. Apabila pengujian diteruskan hingga titik E, maka akan ditemukan titik *yield* yang lebih tinggi lagi.



Gambar 2.9 Diagram tegangan-regangan yang didapatkan dengan *unloading* dan *reloading* (DeGarmo, 1997).

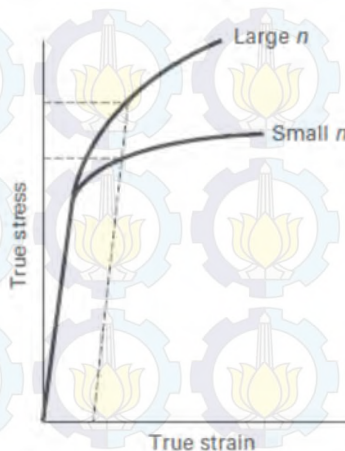
Ketika logam mengalami deformasi plastis, logam akan semakin keras dan kuat, fenomena tersebut dikenal sebagai *strain hardening*. Apabila suatu tegangan dapat menghasilkan deformasi plastis, maka tegangan yang lebih besar diperlukan untuk melanjutkan deformasi berikutnya.

Ber macam-macam material meregang dan mengeras pada kecepatan yang berbeda, dimana perbedaan besar deformasi pada material akan menunjukkan perbedaan kenaikan kekuatan. Fenomena ini dapat dideskripsikan dengan memodelkan secara matematis daerah plastis dari kurva *true stress-true strain* dan menentukan harga ( $n$ ) yang paling sesuai, dimana harga ( $n$ ) merupakan *strain-hardening exponent*. Hal ini dapat ditunjukkan pada rumus (2.6) (DeGarmo, 1997) berikut.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (2.6)$$

Kurva hubungan antara *true stress-true strain* ditunjukkan pada gambar 2.10. Material dengan harga ( $n$ ) yang tinggi akan memiliki peningkatan kekuatan yang tinggi dengan besar deformasi yang kecil. Material dengan harga ( $n$ ) yang kecil akan menunjukkan perubahan yang sedikit pada kekuatannya, namun dengan deformasi yang besar. (DeGarmo, 1997).





Gambar 2.10 Kurva *true stress-true strain* untuk logam dengan *strain hardening* yang besar dan kecil (DeGarmo, 1997).

### 2.2.6 Efek Laju Deformasi

Seperti hal-nya meniup balon atau meregangkan karet gelang dengan kecepatan yang berbeda, pembentukan material pada proses manufaktur dapat dilakukan pada kecepatan yang berbeda pula. Beberapa mesin, seperti mesin *press* hidrolik yang membentuk material dengan kecepatan rendah dan mesin *press* mekanik yang membentuk material dengan kecepatan tinggi.

Laju deformasi dinyatakan sebagai kecepatan, dimana uji tarik sedang dilakukan dan dinyatakan dengan satuan m/s. Di sisi lain, laju regangan (*strain rate*) adalah fungsi dari panjang spesimen. Spesimen yang pendek meregang lebih jauh daripada spesimen yang panjang pada periode yang sama. Sebagai contoh, dua karet gelang dengan panjang yang berbeda, spesimen pertama dengan panjang 20 mm dan spesimen kedua dengan panjang 100 mm. Kemudian secara bersamaan kedua spesimen ditarik sejauh 10 mm selama 1 detik. Regangan teknik (*engineering strain*) pada



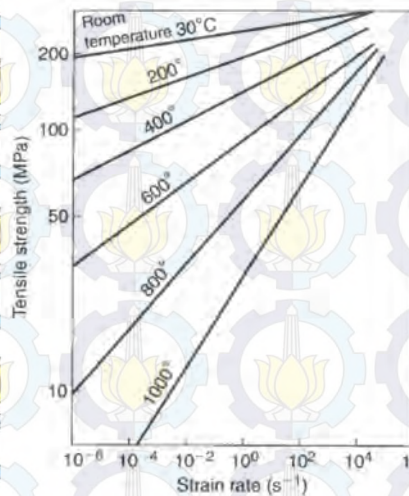
specimen yang pendek adalah  $l_0/20 = 0.5$ , dan pada specimen yang panjang  $l_0/100 = 0.1$ . Sehingga, laju regangannya adalah  $0.5 \text{ s}^{-1}$  dan  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , dengan karet gelang yang lebih pendek mengalami laju regangan lima kali lebih tinggi daripada karet gelang yang panjang, walaupun keduanya diregangkan pada laju deformasi yang sama.

Laju deformasi umumnya digunakan pada bermacam-macam proses manufaktur dan dapat ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 *Range* dari regangan dan laju deformasi yang umum digunakan pada proses manufaktur (Kalpakjian, 2009).

Typical Ranges of Strain and Deformation Rate in Manufacturing Processes		
Process	True strain	Deformation rate (m/s)
Cold working		
Forging, rolling	0.1–0.5	0.1–100
Wire and tube drawing	0.05–0.5	0.1–100
Explosive forming	0.05–0.2	10–100
Hot working and warm working		
Forging, rolling	0.1–0.5	0.1–30
Extrusion	2–5	0.1–1
Machining	1–10	0.1–100
Sheet-metal forming	0.1–0.5	0.05–2
Superplastic forming	0.2–3	$10^{-4}$ – $10^{-2}$

Efek umum yang terjadi pada temperatur dan laju regangan terhadap kekuatan logam ditunjukkan pada gambar 2.11. Seiring bertambahnya laju regangan, semakin bertambah kekuatan dari material (*strain-rate hardening*).



Gambar 2.11 Efek dari laju regangan pada kekuatan tarik *ultimate* untuk aluminium (Kalpakjian, 2009).

*Slope* pada kurva pada gambar 2.11 disebut *strain-rate sensitivity exponent* ( $m$ ). Harga ( $m$ ) diperoleh dari grafik log-log dan dinyatakan dalam rumus (2.7) (Kalpakjian, 2009) berikut.

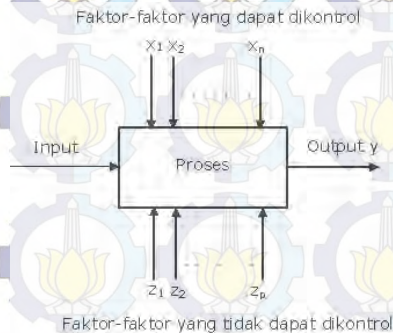
$$\sigma = C\dot{\epsilon}^m \quad (2.7)$$

Dimana ( $C$ ) adalah koefisien kekuatan dan ( $\dot{\epsilon}$ ) adalah *true strain rate* yang didefinisikan sebagai *true strain* pada material yang mengalami deformasi per unit waktu. Dari gambar 2.11, dapat dilihat bahwa sensitivitas kekuatan terhadap laju regangan meningkat seiring bertambahnya temperatur. Dengan kata lain, harga ( $m$ ) akan bertambah seiring meningkatnya temperatur. Pertambahan harga ( $m$ ) mempengaruhi *necking* pada uji tarik. Seiring bertambahnya harga ( $m$ ), material akan meregang lebih panjang sebelum akhirnya terjadi kegagalan (Kalpakjian, 2009).



### 2.2.7 Model Eksperimen

Eksperimen dilaksanakan oleh pelaku investigasi pada lingkup yang diselidiki secara virtual, umumnya mengenai suatu proses maupun sistem. Eksperimen yang dimodelkan adalah rangkaian percobaan yang inputnya sengaja dapat dikendalikan, sehingga dapat diobservasi dan diidentifikasi penyebab perubahan pada outputnya.



Gambar 2.12 Model umum dari proses atau sistem (Montgomery, 1991).

Proses atau sistem yang dipelajari dapat ditunjukkan pada Gambar 2.12. Eksperimen juga dapat memvisualisasikan proses sebagai kombinasi dari mesin, metode, manusia, dan sumber lainnya yang dapat mengubah suatu input (biasanya material) menjadi suatu output yang memiliki respon satu atau lebih yang dapat diobservasi. Beberapa parameter proses  $x_1, x_2, \dots, x_p$  yang dapat dikendalikan dan parameter lain  $z_1, z_2, \dots, z_p$  yang tidak dapat dikendalikan (Montgomery, 1991).

### 2.2.8 Desain Eksperimen

Desain eksperimen adalah proses mengevaluasi dua parameter atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu. Untuk mencapai hal



tersebut secara efektif, maka parameter dan level parameter dibuat bervariasi. Hasil dari kombinasi eksperimen tertentu diamati dan dianalisis. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk menentukan parameter-parameter yang berpengaruh (Iriawan dan Astuti, 2006).

Secara umum, desain eksperimen faktorial dibagi menjadi tiga tahap utama, yaitu:

1. Tahap perencanaan

Langkah-langkah pada tahap ini adalah sebagai berikut:

a. Perumusan masalah

Perumusan masalah harus didefinisikan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam eksperimen yang akan dilakukan.

b. Penentuan tujuan eksperimen

Tujuan yang melandasi eksperimen harus dapat menjawab masalah yang telah dinyatakan pada perumusan masalah.

c. Penentuan parameter tak bebas/parameter respon

Parameter respon memiliki nilai yang tergantung pada parameter-parameter lain. Dalam desain eksperimen faktorial, respon adalah karakteristik kualitas yang terdiri dari dua kategori, yaitu:

1) Karakteristik yang dapat diukur, yaitu semua hasil akhir yang dapat diukur dengan skala kontinyu. Contohnya adalah temperatur, berat, tekanan, dan lain-lain.

2) Karakteristik atribut, yaitu semua hasil akhir yang tidak dapat diukur dengan skala kontinyu, tetapi dapat diklasifikasikan secara berkelompok. Contohnya adalah retak, jelek, baik dan lain-lain.

d. Pengidentifikasian parameter bebas

Parameter bebas adalah parameter yang perubahannya tidak tergantung pada parameter lain. Pada langkah ini parameter-parameter yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua parameter yang diperkirakan mempengaruhi respon harus

diselidiki. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

- e. Pemisahan parameter kontrol dan parameter gangguan  
Parameter-parameter yang diamati dapat dibagi menjadi parameter kontrol dan parameter gangguan. Dalam desain eksperimen faktorial, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua parameter tersebut berbeda. Parameter kontrol adalah parameter yang nilainya dapat dikendalikan, sedangkan parameter gangguan adalah parameter yang nilainya tidak dapat dikendalikan.

- f. Penentuan jumlah level dan nilai level parameter  
Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang diteliti, maka hasil eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak.

## 2. Tahap pelaksanaan

Tahap pelaksanaan meliputi penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen.

- a. Jumlah replikasi  
Replikasi adalah pengulangan perlakuan yang sama dalam suatu percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi. Replikasi ditujukan untuk mengurangi tingkat kesalahan pada eksperimen dan memperoleh harga taksiran dari kesalahan sebuah eksperimen.

- b. Randomisasi  
Dalam sebuah eksperimen, ada pengaruh parameter-parameter lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan, seperti kelelahan operator, fluktuasi daya mesin dan lain-lain. Pengaruh tersebut dapat diperkecil dengan menyebarkan parameter-parameter tersebut melalui randomisasi (pengacakan) urutan percobaan. Secara umum, randomisasi dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- 1) Meratakan pengaruh dari parameter-parameter yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen.



2) Memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan, sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama.

3) Mendapatkan hasil eksperimen yang bebas satu sama lain.

Jika replikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

### 3. Tahap analisis

Pada tahap ini, pengumpulan dan pengolahan data dilakukan. Tahap ini meliputi pengumpulan data, pengaturan data, perhitungan serta penyajian data dalam suatu tampilan tertentu yang sesuai dengan rancangan yang dipilih. Selain itu, perhitungan dan pengujian data statistik dilakukan pada data hasil percobaan.

#### a. Analisis variansi (ANOVA)

Analisis variansi adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik. Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi parameter proses. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua parameter proses atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANOVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (*degree of freedom*, *df*), jumlah kuadrat (*sum of square*, *SS*), kuadrat tengah (*mean of square*, *MS*) dan *F* hitung ( $F_{ratio}$ ,  $F_0$ ) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut.



Tabel 2.2 Tabel analisis variansi (ANAVA).

Sumber variasi	Sum of square (SS)	Degree of freedom (df)	Mean square (MS)	F <sub>ratio</sub> (F <sub>0</sub> )
A	$SS_A = n_A \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$	$k_A - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{d_A}$	$\frac{MS_A}{M_E}$
B	$SS_E = n_B \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{y})^2$	$k_B - 1$	$MS_E = \frac{SS_E}{d_B}$	$\frac{MS_E}{M_E}$
Residual	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_E$	$df_T - df_A - df_B$	$MSE = \frac{SS_E}{d_E}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$	$N - 1$		

dengan:

$k_A$  = banyaknya level pada parameter proses A,

$k_B$  = banyaknya level pada parameter proses B,

$n_A$  = banyaknya replikasi level parameter proses A,

$n_B$  = banyaknya replikasi level parameter proses B,

$\bar{y}$  = rata-rata total,

$N$  = jumlah total pengamatan.

b. Uji distribusi F

Pengujian uji distribusi F dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing parameter proses dan error. Variansi error adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul

karena parameter-parameter yang tidak dapat dikendalikan. Secara umum, hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk parameter proses yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

$H_1$  : sedikitnya ada satu pasangan  $\mu$  yang tidak sama

Kegagalan menolak  $H_0$  mengindikasikan tidak adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon yang dihasilkan pada perlakuan yang berbeda, sedangkan penolakan  $H_0$  mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon tersebut. Respon pada setiap eksperimen dapat dimodelkan menggunakan rumus (2.6) (Bhattacharyya dan Johnson, 1977):

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij} \quad (2.6)$$

Oleh karena itu, hipotesis yang dapat digunakan dalam pengujian ini adalah:

Untuk level parameter proses A  $\rightarrow H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_i = 0$

$H_1$ : paling sedikit ada satu  $\alpha_i \neq 0$

Untuk level parameter proses B  $\rightarrow H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_j = 0$

$H_1$ : paling sedikit ada satu  $\beta_j \neq 0$

Kegagalan menolak  $H_0$  mengindikasikan tidak adanya pengaruh parameter proses A dan parameter proses B terhadap respon serta tidak ada interaksi antara parameter proses A dengan parameter proses B, sedangkan penolakan  $H_0$  mengindikasikan adanya pengaruh parameter proses A dan parameter proses B terhadap respon serta adanya interaksi antara parameter proses A dengan parameter proses B. Kegagalan menolak atau penolakan  $H_0$  berdasarkan pada nilai  $F_{hitung}$  yang dirumuskan:



Untuk level parameter proses A  $\rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E}$

Untuk level parameter proses B  $\rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E}$

Kegagalan menolak  $H_0$  pada masing-masing kasus dilakukan jika mengalami kondisi berikut:

Untuk level parameter proses A  $\rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E}$

Untuk level parameter proses B  $\rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E}$

Bila menggunakan perangkat lunak statistik, kegagalan menolak  $H_0$  dilakukan jika *P-value* lebih besar dari pada  $\alpha$  (level signifikansi). Kegagalan menolak  $H_0$  bisa juga dilakukan apabila nilai  $F_{hitung} > 2$ . Pengujian hipotesa dengan *F-test* atau *t-test* seperti di atas dapat juga dilakukan dengan *P-value* yang memberikan kemudahan dan kecepatan, oleh karena pengolahan data statistik pada penelitian ini dilakukan dengan komputer.

*P-value* adalah istilah yang digunakan dalam program analisa statistik terkomputerisasi untuk menunjukkan tingkat signifikan yang terobservasi. *P-value* didefinisikan sebagai tingkat signifikan statistik terkecil dimana hipotesa nol dapat ditolak dengan didasari oleh bukti yang diperoleh. Analisa statistik yang berdasarkan atas sampel dan *P-value* yang dihasilkan adalah untuk menunjukkan tingkat dukungan dalam menolak  $H_0$  dan selanjutnya menerima  $H_1$ . Sebagai pedoman umum, dalam melakukan interpretasi untuk menolak  $H_0$  berdasarkan *P-value* digunakan sekala berikut (Kolarik, 1995):



- a.  $P\text{-value} \leq 0.01$ , memberikan dukungan yang sangat kuat untuk menolak  $H_0$ .
- b.  $0.01 < P\text{-value} \leq 0.05$ , memberikan dukungan yang kuat untuk menolak  $H_0$ .
- c.  $0.05 < P\text{-value} \leq 0.10$ , memberikan dukungan untuk menolak  $H_0$ .
- d.  $P\text{-value} > 0.10$ , tidak memberikan dukungan untuk menolak  $H_0$ .

c. Uji asumsi *residual*

*Residual* didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dan nilai dugaannya adalah  $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ . Dalam analisis regresi terdapat asumsi bahwa *residual* bersifat bebas satu sama lain (independen), mempunyai rata-rata sama dengan nol dan variansi yang konstan  $\sigma^2$  (identik), serta berdistribusi normal atau  $\varepsilon_i \sim IIDN(0, \sigma^2)$ . Oleh karena itu dalam setiap pendugaan model harus dilakukan pemeriksaan asumsi tersebut apakah terpenuhi atau tidak.

1. Uji independensi

Uji independen digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak, yang berarti antar pengamatan tidak ada korelasi (independen). Pemeriksaan asumsi ini dilakukan dengan menggunakan grafik *autocorrelation function* (ACF).

2. Uji homogenitas

Pengujian homogenitas variansi atau uji identik bertujuan untuk memenuhi apakah *residual* mempunyai penyebaran yang sama. Hal ini dilakukan dengan memeriksa grafik  $e_i$  terhadap  $\hat{Y}_i$  (secara visual). Jika penyebaran datanya acak (menyebar disekitar garis nol) dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu, maka asumsi identik terpenuhi.

3. Uji kenormalan

Grafik *Normal probability* pada *software* Minitab menyatakan probabilitas dari *residual* suatu respon. Selain itu, dengan *Kolmogorov-Smirnov normality*

*test* juga dapat digunakan dalam pengujian kenormalan *residual*. Hipotesa yang digunakan adalah  $H_0$  gagal ditolak apabila  $P\text{-value} > \alpha$ , yaitu:

$H_0$ : *residual* berdistribusi normal.

$H_1$ : *residual* tidak berdistribusi normal.

### 2.2.9 Metode Faktorial

Dalam statistika, eksperimen faktorial adalah percobaan yang terdiri dari dua parameter atau lebih yang masing-masing parameter mempunyai level tertentu. Setiap unit percobaan mengambil semua kemungkinan kombinasi pada setiap level parameter. Dalam pelaksanaannya percobaan faktorial harus dilakukan secara acak untuk mengurangi bias pada hasil. Tabel 2.3 menunjukkan percobaan faktorial 3 parameter dengan masing-masing level dan dua replikasi.



Tabel 2.3 Susunan data rancangan faktorial tiga parameter.

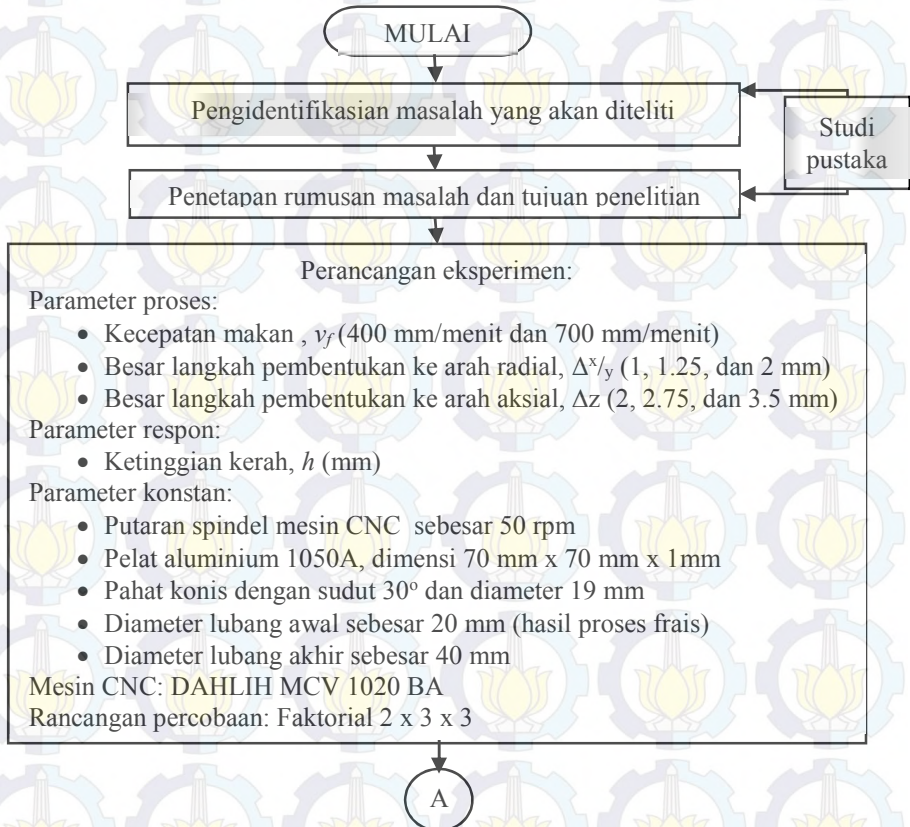
Parameter Proses			Parameter Respon	
Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	Replikasi 1	Replikasi 2
Level 1	Level 1	Level 1	$X_{1111}$	$X_{1112}$
		Level 2	$X_{1121}$	$X_{1122}$
		Level 3	$X_{1131}$	$X_{1132}$
	Level 2	Level 1	$X_{1211}$	$X_{1212}$
		Level 2	$X_{1221}$	$X_{1222}$
		Level 3	$X_{1231}$	$X_{1232}$
	Level 3	Level 1	$X_{1311}$	$X_{1312}$
		Level 2	$X_{1321}$	$X_{1322}$
		Level 3	$X_{1331}$	$X_{1332}$
Level 2	Level 1	Level 1	$X_{2111}$	$X_{2112}$
		Level 2	$X_{2121}$	$X_{2122}$
		Level 3	$X_{2131}$	$X_{2132}$
	Level 2	Level 1	$X_{2211}$	$X_{2212}$
		Level 2	$X_{2221}$	$X_{2222}$
		Level 3	$X_{2231}$	$X_{2232}$
	Level 3	Level 1	$X_{2311}$	$X_{2312}$
		Level 2	$X_{2321}$	$X_{2322}$
		Level 3	$X_{2331}$	$X_{2332}$



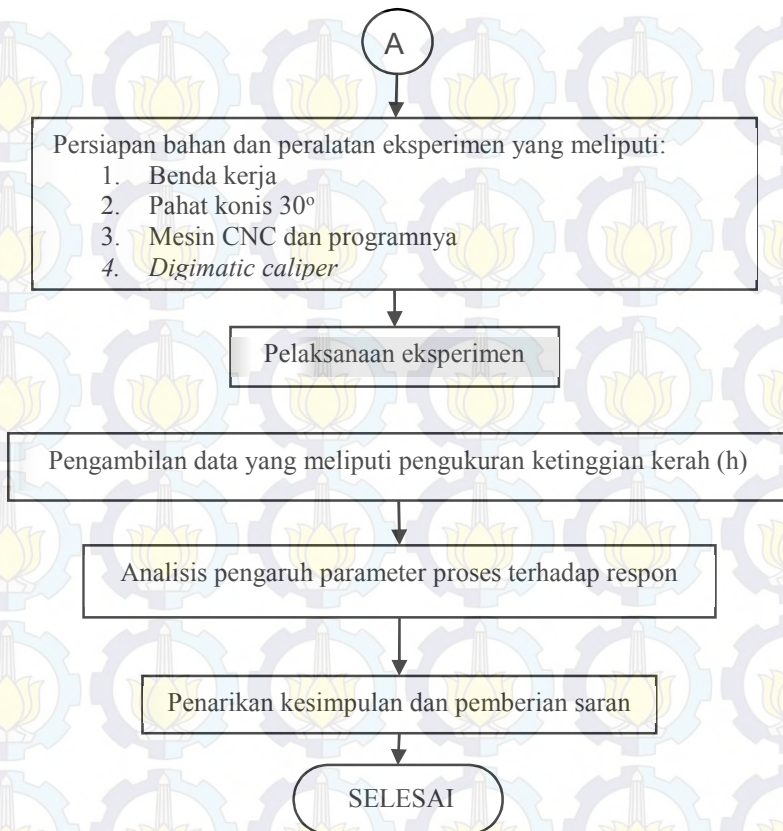
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian (lanjutan).

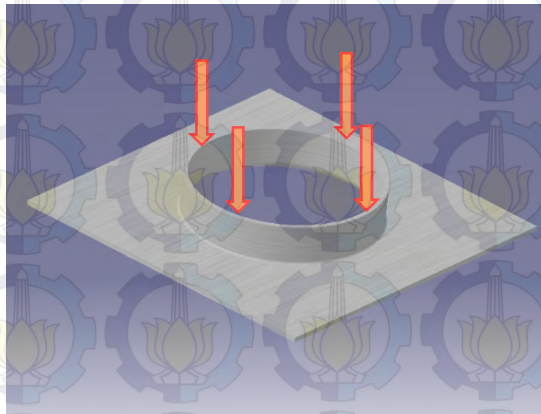
### 3.2 Pemilihan Parameter Respon dan Pengukurannya

Parameter respon yang meliputi ketinggian kerah (h) dari proses IBHF ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Parameter respon proses IBHF.

Untuk mengukur ketinggian kerah (*collar*) digunakan *digital vernier caliper* pada 4 titik pengukuran. Tinggi kerah menggunakan rata-rata dari hasil keempat pengukuran. Skema pengukuran ketinggian kerah ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pengukuran ketinggian kerah.

### 3.3 Pemilihan Parameter Proses

Parameter proses merupakan parameter yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan berdasarkan tujuan dari penelitian serta pertimbangan-pertimbangan lain. Parameter-parameter proses yang digunakan pada penelitian ini adalah:



1. Kecepatan makan ( $v_f$ ) mm/ menit.
2. Besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x_y$ ) mm.
3. Besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) mm.

Pada pelaksanaan penelitian, faktor-faktor lain yang ditentukan dan dikonstankan ditunjukkan pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Faktor-faktor yang ditentukan dan dikonstankan.

No	Faktor	Keterangan
1	Bahan pelat	Aluminium 1050A
2	Dimensi pelat	70 mm $\times$ 70 mm $\times$ 1 mm
3	Bahan pahat IBHF	<i>High speed steel</i> (HSS)
4	Diameter & sudut pahat IBHF	19 mm dan 30°
5	Mesin yang digunakan	Mesin CNC, <i>DAHLIH MCV 1020 BA</i>
6	Diameter awal pembentukan	20 mm, hasil proses frais
7	Diameter akhir	40 mm

Faktor-faktor lain yang sulit dikendalikan adalah kelembaban udara, temperatur ruangan, getaran mesin, dan faktor-faktor lainnya dianggap sebagai gangguan. Tabel 3.2 menunjukkan sifat-sifat fisik dan mekanik benda kerja yang diteliti.

Tabel 3.2 Sifat fisik dan mekanik pelat aluminium 1050 A.

Sifat					
Kekuatan tarik	=	100-135 N/mm <sup>2</sup>	Kekuatan <i>yield</i>	=	Min 75 N/mm <sup>2</sup>
Modulus elastisitas	=	68.3 GPa	Konduktifitas panas	=	229 W/m.K
Kekuatan geser	=	70 N/mm <sup>2</sup>	Kapasitas lebur	=	645-657 °C
Kekerasan	=	21 HB	Koefisien muai	=	23.5 x 10 <sup>-6</sup> 1/K
<i>Elongation</i> (A50)	=	38%	Konduktivitas elektrik	=	58.4% IACS

### 3.4 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian faktorial pada penelitian ini mencakup tiga parameter, dimana satu parameter memiliki dua level dan dua parameter lainnya masing-masing terdiri dari tiga level. Rancangan ini biasa disebut faktorial 2 x 3 x 3. Penelitian ini dilakukan dengan dua replikasi pada masing-masing respon. Tabel 3.3 merupakan tabel isian untuk penelitian yang dilaksanakan.

Tabel 3.3 Isian rancangan eksperimen.

Parameter proses			Parameter respon	
Kecepatan makan, $v_f$ (mm/menit)	Besarnya langkah pembentukan ke arah radial, $\Delta x/y$ (mm)	Besarnya langkah pembentukan ke arah aksial, $\Delta z$ (mm)	Ketinggian kerah, $h$ (mm)	
			R1	R2
400	1	2		
		2.75		
		3.5		
	1.25	2		
		2.75		
		3.5		
	2	2		
		2.75		
		3.5		
700	1	2		
		2.75		
		3.5		
	1.25	2		
		2.75		
		3.5		
	2	2		
		2.75		
		3.5		



### 3.5 Tempat Penelitian dan Peralatan yang Digunakan

Percobaan dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang dengan fasilitas sebagai berikut:

#### 3.5.1 Mesin Frais CNC

Proses IBHF dilakukan dengan mesin frais CNC merk Dahlih, tipe MCV 1020 BA seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan spesifikasi dari mesin CNC ditunjukkan pada Tabel 3.4 berikut.



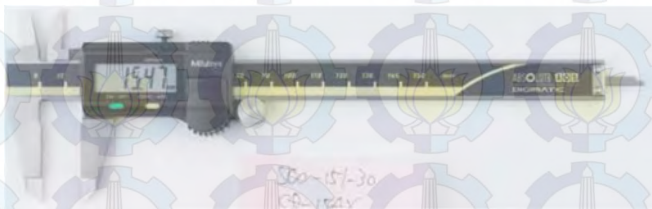
Gambar 3.4 Proses IBHF menggunakan mesin frais CNC Dahlih MCV 1020 BA.

Tabel 3.4 Spesifikasi dari mesin frais CNC Dahlih MCV 1020  
BA

No.	Spesifikasi	Keterangan
1	Daya motor Utama	11 kW
2	Langkah kerja	1020(X) x 550(Y) x 560(Z) mm
3	Putaran spindel	50 – 8000 rpm, <i>infinitely variable</i>
4	Laju makan arah X/Y/Z	1 – 10000 mm/menit
5	Makan cepat arah X/Y/Z	30 m/menit
6	Gaya makan arah X/Y	4000 N
7	Gaya makan arah Z	6000 N
8	Jumlah pemegang pahat	24 buah
9	Dimensi luar	3260 mm x 3060 mm x 2450 mm
10	Berat mesin	6000 Kg

### 3.5.2 Digimatic Caliper

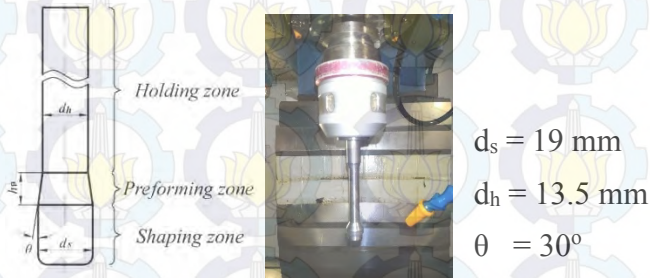
Untuk pengukuran ketinggian kerah digunakan mistar insut digital (*digimatic caliper*) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5. Mistar insut digital yang digunakan memiliki kecermatan 0.01 mm.



Gambar 3.5 Digimatic caliper Mitutoyo

### 3.5.3 Pahat Konis

Pahat yang digunakan adalah pahat konis yang terbuat dari material HSS dengan profil yang sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.6 dibawah.



Gambar 3.6 Profil pahat konis.

### 3.5.4 Jig Penahan Pelat Aluminium

Jig yang digunakan sebagai penahan pelat dengan dimensi maksimum 70 mm x 70 mm, dimensi tebal pelat yang mampu di tahan dapat di variasikan dengan diameter maksimum 41 mm. Jig yang digunakan untuk menahan pelat aluminium ditunjukkan pada Gambar 3.7 berikut.



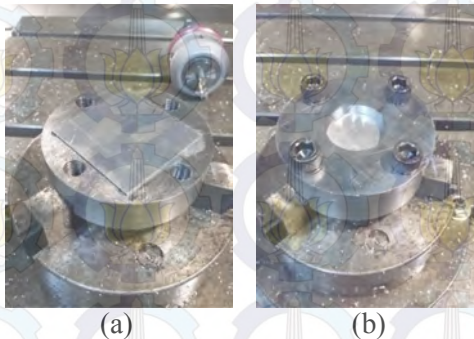
Gambar 3.7 Jig yang digunakan untuk menahan pelat aluminium.



### 3.6 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini untuk mendapatkan ketinggian adalah sebagai berikut:

1. Benda kerja pelat aluminium dipotong dengan ukuran 70 mm x 70 mm dan diberi penomoran.
2. Jig penahan pelat dan mesin CNC beserta programnya disiapkan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7.
3. Benda kerja aluminium yang sudah dipotong sesuai ukuran dipasang pada jig penahan pelat. Kemudian, jig penahan pelat bagian atas dipasang dan dikencangkan baut-bautnya seperti ditunjukkan pada gambar 3.8.



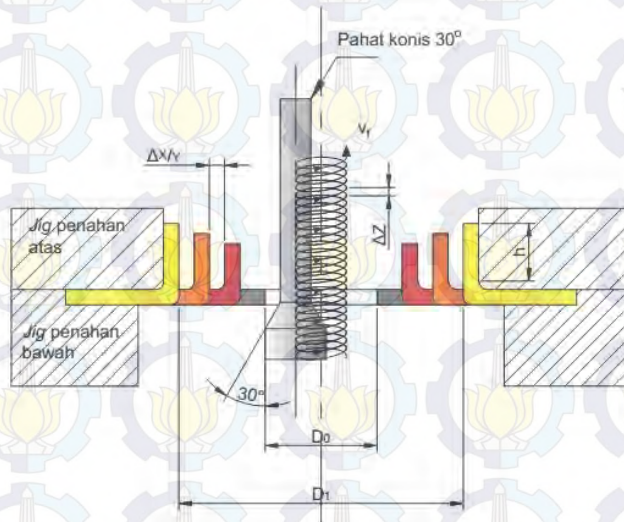
Gambar 3.8 Kondisi benda kerja, a) sebelum dan b) sesudah dicekam dengan jig penahan pelat.

4. Pelat yang telah dicekam kemudian dilubangi dengan diameter sebesar 20 mm dengan pahat *end mill* dengan diameter sebesar 10 mm seperti ditunjukkan pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Pelat alumunium dilubangi dengan pahat *end mill*.

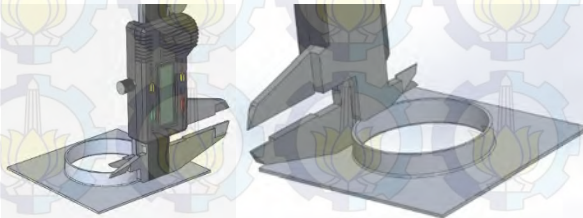
5. Pelat alumunium yang telah dilubangi dengan diameter 20 mm sebagai lubang awal kemudian dibentuk dengan pahat konis 30°. Skema proses pembentukan IBHF dapat ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Skema pembentukan melalui proses IBHF.

Gambar 3.10 menunjukkan gerakan pahat dimulai dari pelat bagian bawah yang kemudian bergerak helikal menuju ke bagian atas pelat. Kecepatan makan ( $v_f$ ) merupakan kecepatan pahat bergerak helikal dari ujung bawah hingga ujung atas alur helik. Besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) merupakan *pitch* dari alur pergerakan helikal pahat ke arah sumbu  $z$ . Besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x/y$ ) merupakan jarak antara langkah pembentukan pertama dan kedua, kedua dan ketiga, dan seterusnya. Pembentukan ke arah radial merupakan pergerakan pahat pada sumbu  $x$  relatif terhadap sumbu  $y$ . Perbedaan warna pada gambar 3.10 merupakan tahap pembentukan yang terjadi pada pelat. Jumlah tahap pembentukan pada pelat tergantung dari besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x/y$ ). ( $D_0$ ) adalah lubang awal pembentukan, ( $D_1$ ) adalah lubang akhir pembentukan, dan ( $h$ ) adalah ketinggian kerah.

6. Setelah proses pembentukan berakhir, jig penahan pelat bagian atas dilepas. Benda kerja kemudian diukur ketinggian kerahnya ( $h$ ) seperti ditunjukkan pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Pengukuran ketinggian kerah ( $h$ )



## BAB IV

### ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pengaruh Parameter Kecepatan Makan, Besar Langkah Pembentukan ke Arah Radial, dan Besar Langkah Pembentukan ke Arah Aksial

Pelaksanaan eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan kecepatan makan ( $v_f$ ), besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta^x/y$ ), dan besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) pada proses IBHF. Ketiga parameter proses tersebut diduga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketinggian kerah yang dihasilkan. Pengambilan data untuk tiap kombinasi parameter proses dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali untuk memastikan keakuratan data. Tabel 4.1 menunjukkan data ketinggian kerah yang diperoleh selama eksperimen.

Tabel 4.1. Data ketinggian kerah hasil eksperimen.

Parameter proses			Parameter respon		
Kecepatan makan, $v_f$ (mm/menit)	Besar langkah pembentukan ke arah radial, $\Delta^x/y$ (mm)	Besar langkah pembentukan ke arah aksial, $\Delta z$ (mm)	Ketinggian kerah, $h$ (mm)		
			R1	R2	Rata-rata
400	1	2	7.06	7.06	7.06
		2.75	6.93	7.04	6.99
		3.5	6.88	6.83	6.86
	1.25	2	7.19	7.19	7.19
		2.75	7.02	6.99	7.00
		3.5	6.98	6.94	6.96

Tabel 4.1. Data ketinggian kerah hasil eksperimen (lanjutan)

Parameter proses			Parameter respon		
Kecepatan makan, $v_f$ (mm/menit)	Besar langkah pembentukan ke arah radial, $\Delta x/y$ (mm)	Besar langkah pembentukan ke arah aksial, $\Delta z$ (mm)	Ketinggian kerah, $h$ (mm)		
			R1	R2	Rata-rata
400	2	2	7.46	7.39	7.43
		2.75	7.37	7.34	7.35
		3.5	7.20	7.17	7.19
700	1	2	7.03	7.11	7.07
		2.75	7.03	6.99	7.01
		3.5	6.90	6.90	6.90
	1.25	2	7.19	7.13	7.16
		2.75	7.04	6.99	7.01
		3.5	6.94	6.95	6.95
	2	2	7.41	7.42	7.42
		2.75	7.37	7.21	7.29
		3.5	7.27	7.11	7.19

Sumber: Hasil perhitungan

Data dari hasil eksperimen diuji secara statistik untuk mengetahui parameter proses mana yang berpengaruh secara signifikan terhadap parameter respon. Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui apakah kecepatan makan, besar langkah pembentukan ke arah radial, dan besar langkah pembentukan ke arah aksial memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketinggian kerah. Tabel analisis variansi (ANOVA) parameter proses terhadap ketinggian kerah yang disusun berdasarkan perhitungan ditunjukkan pada tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Analisis variansi (ANAVA) parameter proses terhadap ketinggian kerah.

Sumber	df	SS	MS	$F_{test}$	P-value
$v_f$	1	0.000042	0.000042	0.05	0.828
$\Delta^x/y$	2	0.368189	0.184095	217.19	0.000
$\Delta z$	2	0.138194	0.069097	81.52	0.000
Eror	12	0.010172	0.000848		
Total	17	0.516597			

Sumber: Hasil perhitungan

P-value menunjukkan parameter proses mana yang mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan. P-value yang lebih kecil dari *level of significant* ( $\alpha$ ) mengindikasikan bahwa parameter proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon. Dalam penelitian ini  $\alpha$  yang dipakai bernilai 5%. Penarikan kesimpulan menggunakan P-value untuk ketinggian permukaan yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 adalah sebagai berikut:

1. Untuk parameter proses kecepatan makan ( $v_f$ ).  
P-value = 0.828 >  $\alpha$  = 0.05, maka secara statistik  $v_f$  tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketinggian kerah.
2. Untuk parameter proses besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta^x/y$ )  
P-value = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05, maka secara statistik parameter  $\Delta^x/y$  memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketinggian kerah.
3. Untuk parameter proses besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ )  
P-value = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05, maka secara statistik parameter  $\Delta z$  memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketinggian kerah.



Kondisi  $H_0$  pada respon ketinggian kerah untuk masing-masing parameter ditunjukkan oleh Tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.3 Kondisi hipotesis nol pada respon ketinggian.

Sumber variasi	Kondisi $H_0$
$v_f$	Gagal ditolak
$\Delta^x/y$	Ditolak
$\Delta z$	Ditolak

Sumber: Hasil perhitungan

Uji Tukey dilakukan untuk mengetahui kecepatan makan ( $v_f$ ), besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta^x/y$ ), dan besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) yang berpengaruh terhadap ketinggian kerah. Tabel 4.4 menunjukkan hasil uji Tukey pada kecepatan makan ( $v_f$ ). Tabel 4.5 menunjukkan hasil uji Tukey pada besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta^x/y$ ), sedangkan Tabel 4.6 menunjukkan hasil uji Tukey pada besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ).

Tabel 4.4 Hasil uji Tukey pada  $v_f$  untuk respon ketinggian kerah.

$v_f$ (mm/menit)	N	Mean	Grouping
400	9	7.11361	A
700	9	7.11056	A

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.5 Hasil uji Tukey pada  $\Delta^x/y$  untuk respon ketinggian kerah.

$\Delta^x/y$ (mm)	N	Mean	Grouping
2.00	6	7.31083	A
1.25	6	7.04523	B
1.00	6	6.98021	C

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.6 Hasil uji Tukey pada  $\Delta z$  untuk respon ketinggian kerah.

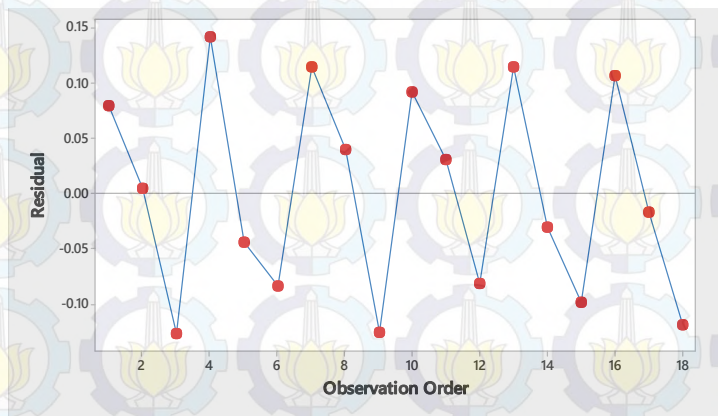
$\Delta z$ (mm)	N	Mean	Grouping
2.00	6	7.22063	A
2.75	6	7.10958	B
3.50	6	7.00604	C

Sumber: Hasil perhitungan

Hasil uji Tukey pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa ketinggian kerah yang dihasilkan pada kedua kecepatan makan ( $v_f$ ) sama. Tabel 4.5 menunjukkan bahwa ketinggian kerah yang dihasilkan berbeda pada ketiga level besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta^x/y$ ). Tabel 4.6 menunjukkan bahwa ketinggian kerah yang dihasilkan berbeda pada ketiga level besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ). Analisis variansi mensyaratkan bahwa *residual* harus memenuhi tiga asumsi, yaitu bersifat identik, independen dan berdistribusi normal dengan rata-rata nol dengan variansi tertentu.

#### 4.1.1 Uji Identik

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa *residual* tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian asumsi *residual* identik terpenuhi.

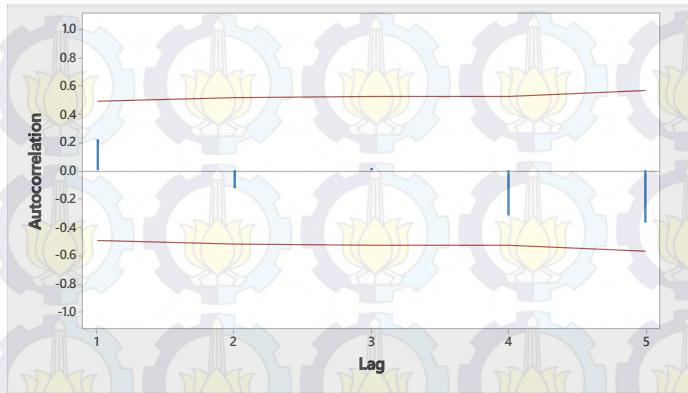


Gambar 4.1 Grafik *residual* ketinggian kerah *versus* order.

#### 4.1.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan grafik ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, tidak ada nilai ACF pada tiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar *residual*, yang artinya *residual* bersifat independen.





Gambar 4.2 Grafik ACF pada respon ketinggian kerah.

### 4.1.3 Uji Kenormalan

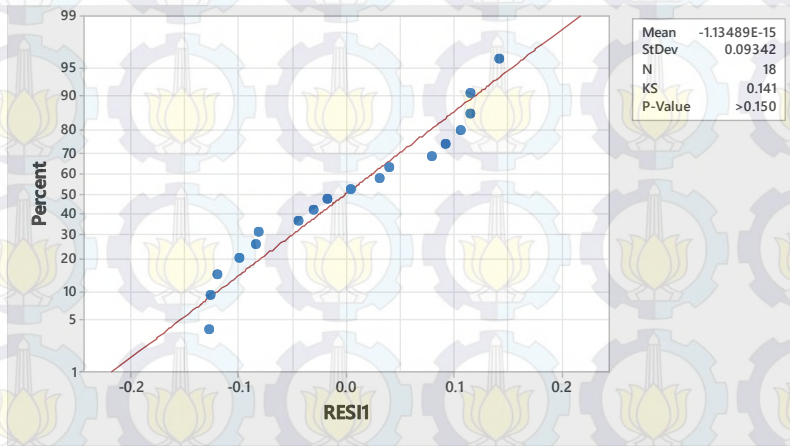
Uji kenormalan *residual* dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Hipotesis yang digunakan adalah:

- $H_0$ : *Residual* berdistribusi normal
- $H_1$ : *Residual* tidak berdistribusi normal
- $H_0$  ditolak jika *P-value* lebih kecil dari pada  $\alpha = 0.05$ .

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa dengan uji Kolmogorov-Smirnov diperoleh:

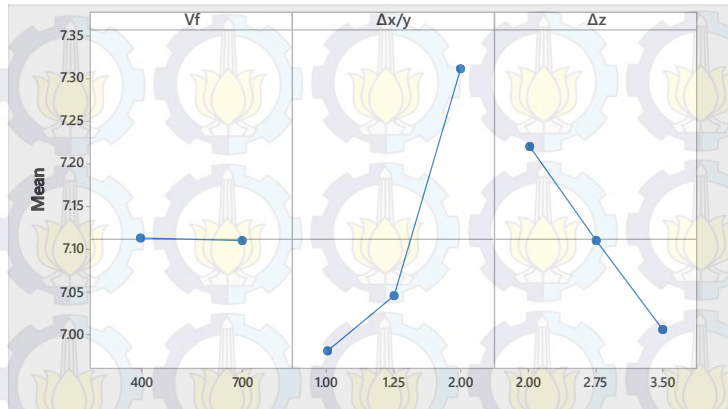
- *P-value* 0.150 yang berarti lebih besar dari  $\alpha = 0.05$ . Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa  $H_0$  gagal ditolak atau *residual* berdistribusi normal.
- *Mean* bernilai sebesar  $-1.13489 \times 10^{-15}$  yang berarti sangat kecil atau mendekati nol.
- Variansi di *residual* adalah sebesar  $(0.141)^2 = 0.019881$

Dengan demikian asumsi *residual* berdistribusi normal dengan nilai mean sama dengan nol (atau mendekati nol) dan memiliki variansi tertentu (sebesar 0.019881) telah terpenuhi.



Gambar 4.3 Grafik uji distribusi normal terhadap *residual* pada respon ketinggian kerah.

Secara grafik, hubungan antara parameter kecepatan makan ( $v_f$ ), besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x/y$ ), dan besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) pada proses IBHF terhadap respon ketinggian kerah ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik pengaruh kecepatan makan ( $v_f$ ), besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x/y$ ), dan besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) terhadap ketinggian kerah.

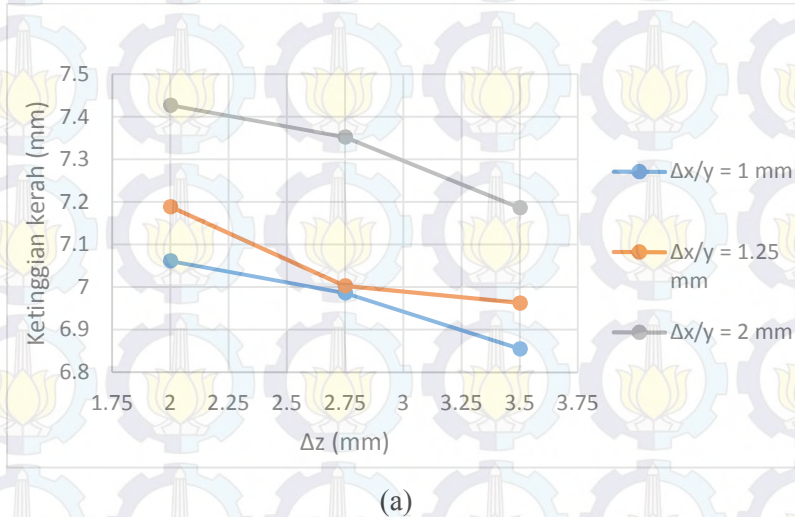
Gambar 4.4 menunjukkan bahwa kecepatan makan ( $v_f$ ) tidak mempengaruhi ketinggian kerah. Namun peningkatan besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x/y$ ) akan meningkatkan nilai ketinggian kerah dan semakin besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) akan menurunkan nilai ketinggian kerah pada proses IBHF. Tinggi kerah minimal adalah sebesar 6.86 mm dan terbentuk pada kombinasi kecepatan makan ( $v_f$ ) sebesar 400 mm/menit, besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x/y$ ) sebesar 1 mm, dan besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) sebesar 3.5 mm. Ketinggian kerah maksimum adalah sebesar 7.43 mm dan terbentuk pada kombinasi kecepatan makan ( $v_f$ ) sebesar 400 mm/menit, besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x/y$ ) sebesar 2 mm, dan besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) sebesar 2 mm.



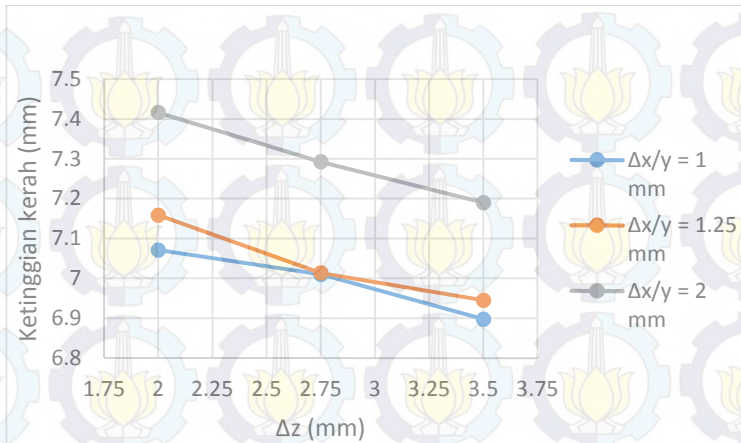
## 4.2 Pengaruh Parameter Proses Terhadap Ketinggian Kerah

### 4.2.1 Pengaruh Besar Langkah Pembentukan ke Arah Aksial ( $\Delta z$ ) terhadap Ketinggian Kerah ( $h$ )

Grafik untuk pengaruh besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) terhadap ketinggian kerah ( $h$ ) pada kecepatan makan 400 mm/min dan 700 mm/min ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik ( $\Delta z$ ) vs ( $h$ ) pada kecepatan makan a) 400 mm/min dan b) 700 mm/min



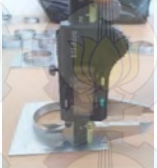
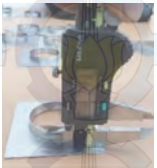
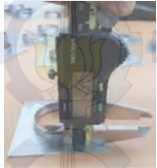

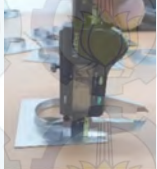



(b)

Gambar 4.5 Grafik ( $\Delta z$ ) vs ( $h$ ) pada kecepatan makan a) 400 mm/min dan b) 700 mm/min (lanjutan)


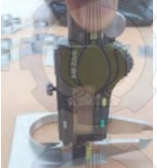
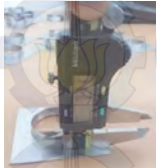





Ditunjukkan pada Gambar 4.5, bahwa kedua grafik memiliki kemiripan dimana pada grafik ( $\Delta x/y$ ) yang konstan dan ( $\Delta z$ ) yang bervariasi memiliki respon ketinggian kerah yang berbeda. Pada kecepatan makan 400 mm/min dan ( $\Delta x/y$ ) yang konstan didapatkan ketinggian kerah maksimum terjadi pada saat ( $\Delta z$ ) paling kecil yaitu sebesar 2 mm. Hal ini sesuai dengan teori, dimana laju regangan yang rendah mengakibatkan peningkatan kekuatan material yang rendah pula. Oleh karena kekuatan material yang rendah, maka regangan dapat dicapai semaksimal mungkin. Laju regangan yang rendah ini dapat diindikasikan dari besar langkah pembentukan bertahap yang kecil. Pada kecepatan makan 700 mm/min juga terjadi hal yang sama, yaitu ketinggian maksimum kerah terjadi pada ( $\Delta z$ ) yang kecil yaitu sebesar 2 mm.

Perbedaan ketinggian kerah hasil pengukuran dari proses IBHF dengan variasi ( $\Delta z$ ) terhadap ( $\Delta x/y$ ) dan ( $v_f$ ) yang dikonstantkan ditunjukkan pada Tabel 4.7 sampai dengan Tabel 4.9 berikut.

Tabel 4.7 Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter,  $v_f = 400$  mm/min,  $\Delta x/y = 2$  mm, dan  $\Delta z = 2$  mm

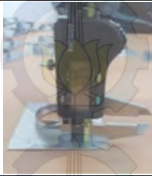






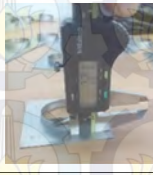
No	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
1					7.46
2					7.39
Rata-rata = 7.43 mm					

Tabel 4.8 Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter,  $v_f = 400$  mm/min,  $\Delta x/y = 2$  mm, dan  $\Delta z = 2.75$  mm

No	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
1					7.37
2					7.34
Rata-rata = 7.35 mm					



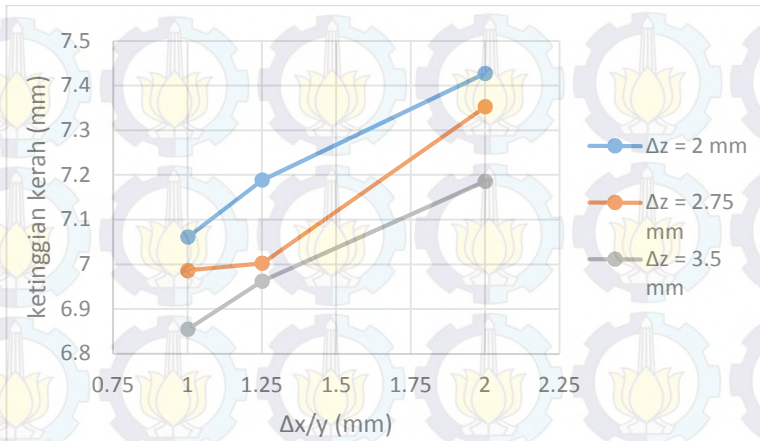
Tabel 4.9 Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter,  $v_f = 400$  mm/min,  $\Delta^x/y = 2$  mm, dan  $\Delta z = 3.5$  mm

No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
1					7.20
2					7.18
Rata-rata = 7.19 mm					

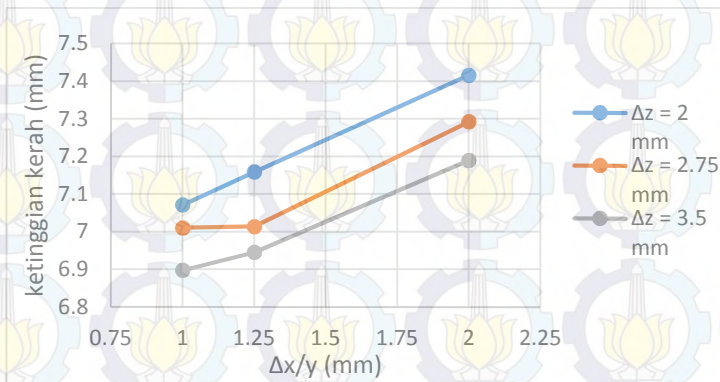
Tabel 4.7 sampai dengan 4.9 menunjukkan hasil pengukuran, bahwa ketinggian kerah paling tinggi dihasilkan pada parameter  $\Delta z = 2$  mm. Kondisi ini berlaku apabila parameter proses lainnya dikonstantakan yaitu,  $v_f = 400$  mm/min dan  $\Delta^x/y = 2$  mm.

#### 4.2.2 Pengaruh Besar Langkah Pembentukan ke Arah Radial ( $\Delta^x/y$ ) terhadap Ketinggian Kerah ( $h$ )

Grafik untuk pengaruh besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta^x/y$ ) terhadap ketinggian kerah ( $h$ ) pada kecepatan makan 400 mm/min dan 700 mm/min ditunjukkan pada Gambar 4.6.



(a)



(b)



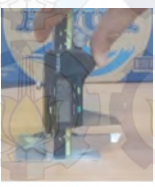

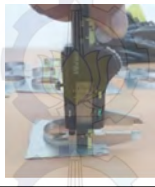



Gambar 4.6 Grafik ( $\Delta^x/y$ ) vs ( $h$ ) pada kecepatan makan a) 400 mm/min dan b) 700 mm/min

Ditunjukkan pada Gambar 4.6, bahwa pada kedua grafik memiliki kemiripan, dimana pada grafik ( $\Delta z$ ) yang konstan dan ( $\Delta^x/y$ ) yang bervariasi memiliki respon ketinggian kerah yang berbeda. Pada kecepatan makan 400 mm/min dan ( $\Delta z$ ) yang

konstan didapatkan ketinggian kerah maksimum terjadi pada saat ( $\Delta^x/y$ ) paling besar yaitu sebesar 2 mm. Hal ini sesuai dengan mekanisme pembentukan, dimana ketinggian maksimum dapat tercapai pada saat luasan untuk pembentukan ke arah radial semakin besar. Luasan untuk pembentukan yang besar dapat diindikasikan dari besar langkah ke arah radial yang besar. Pada kecepatan makan 700 mm/min juga mengalami hal yang sama, yaitu ketinggian maksimum kerah terjadi pada ( $\Delta^x/y$ ) yang besar yaitu sebesar 2 mm.

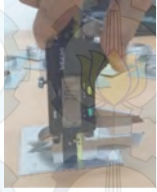

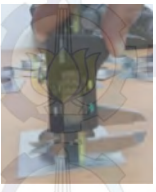
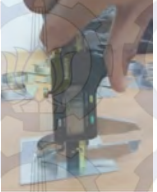




Perbedaan ketinggian kerah hasil pengukuran dari proses IBHF dengan variasi ( $\Delta z$ ) terhadap ( $\Delta^x/y$ ) dan ( $v_f$ ) yang dikonstantkan dapat ditunjukkan pada Tabel 4.10 sampai dengan tabel 4.12 berikut.

Tabel 4.10 Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter,  $v_f = 400$  mm/min,  $\Delta^x/y = 1$  mm, dan  $\Delta z = 2$  mm





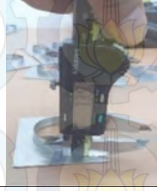


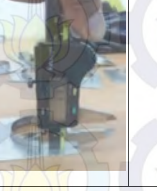
No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
1					7.06
2					7.06
Rata-rata = 7.06 mm					



Tabel 4.11 Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter,  $v_f = 400$  mm/min,  $\Delta x/y = 1.25$  mm, dan  $\Delta z = 2$  mm

No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
1					7.19
2					7.19
Rata-rata = 7.19 mm					

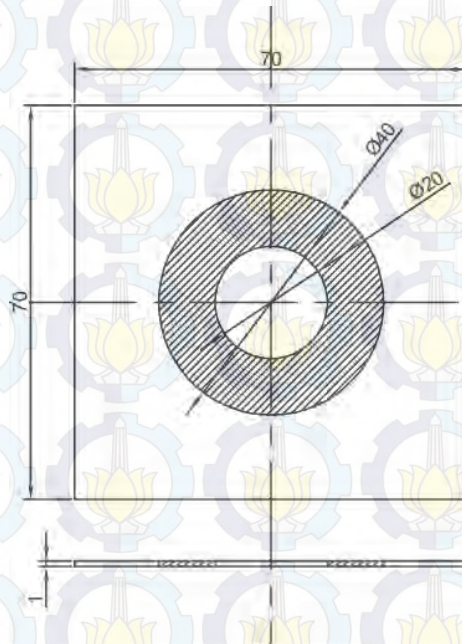
Tabel 4.12 Pengukuran ketinggian kerah dengan parameter,  $v_f = 400$  mm/min,  $\Delta x/y = 2$  mm, dan  $\Delta z = 2$  mm

No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
1					7.46
2					7.39
Rata-rata = 7.43 mm					

Tabel 4.10 sampai dengan 4.12 menunjukkan hasil pengukuran, bahwa ketinggian kerah paling tinggi dihasilkan pada parameter  $\Delta x/y = 2$  mm. Kondisi ini berlaku apabila parameter proses lainnya dikonstantakan yaitu,  $v_f = 400$  mm/min dan  $\Delta z = 2$  mm.

#### 4.3 Perbedaan Ketinggian Kerah Hasil Proses dengan Ketinggian Kerah Hasil Perhitungan Asumsi Volume Konstan

Asumsi volume konstan diterapkan pada penelitian proses IBHF ini, dimana daerah terjadinya pembentukan dibatasi dari diameter awal lubang sebesar 20 mm hingga diameter akhir lubang sebesar 40 mm. Daerah yang dibatasi dan diasumsikan bervolume konstan selama proses IBHF dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Daerah yang dibatasi selama proses IBHF

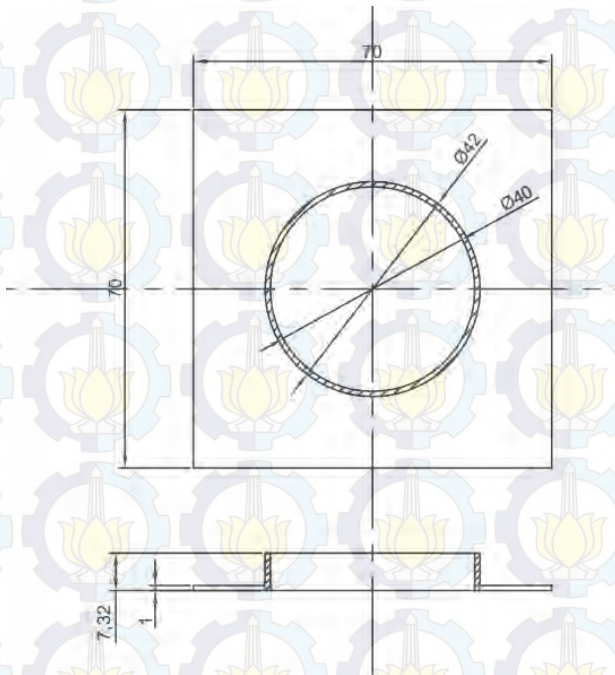
Pada Gambar 4.6, daerah yang diarsir merupakan daerah yang dibatasi pembentukannya dan diasumsikan bervolume konstan. Volume yang dikonstantkan dapat dihitung sebagai berikut.

$$V = (\pi \times 20^2 \times 1) - (\pi \times 10^2 \times 1)$$

$$V = 1256.637 - 314.159$$

$$V = 942.478 \text{ m}^3$$

Setelah proses pembentukan berakhir, dengan volume yang konstan ketinggian kerah dapat diestimasi. Ketinggian kerah yang diestimasi dari asumsi volume konstan dapat ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Estimasi ketinggian kerah dengan asumsi volume konstan



Pada Gambar 4.7, daerah yang diarsir adalah daerah dengan asumsi volume konstan, dimana volumenya sama dengan saat sebelum proses pembentukan yaitu  $942.478 \text{ mm}^3$ . Oleh karena itu, dapat dihitung ketinggian kerah yang terjadi apabila diberlakukan asumsi volume konstan sebagai berikut.

$$942.478 = (\pi \times 21^2 \times h) - (\pi \times 20^2 \times h)$$

$$942.478 = (1385.442 \times h) - (1256.637 \times h)$$

$$942.478 = 128.805 \times h$$

$$h = 7.317 \cong 7.32 \text{ mm}$$

Ketinggian kerah yang dihasilkan dari asumsi volume konstan adalah ketinggian kerah dari pengukuran ujung kerah hingga bagian bawah pelat. Apabila disesuaikan dengan ketinggian pada saat pengukuran ketinggian kerah menggunakan jangka sorong digital, maka tinggi kerah hasil perhitungan dengan asumsi volume dikurangi tebal pelat. Oleh karena itu, ketinggian kerah hasil perhitungan dengan asumsi volume konstan adalah sebesar 6.32 mm. Pada data hasil pengukuran ketinggian kerah, seluruh kombinasi parameter proses menghasilkan ketinggian kerah yang lebih tinggi daripada ketinggian kerah hasil perhitungan dengan asumsi volume konstan. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kerah hasil proses IBHF mengalami penipisan ketebalan. Kemudian, hal ini dibuktikan dari data hasil ketebalan pada ujung kerah (terlampir). Pada setiap kombinasi parameter proses, dihasilkan ketebalan kerah yang nilainya lebih kecil dari 1 mm. Oleh karena itu, asumsi volume konstan terpenuhi.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian yang berjudul “Studi Eksperimen Pengaruh Parameter Proses Terhadap Ketinggian Kerah Pada Proses *Incremental Backward Hole-Flanging* dengan Benda Kerja Pelat Aluminium,” maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai kecepatan makan ( $v_f$ ) tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon ketinggian kerah hasil proses IBHF.
2. Nilai besar langkah pembentukan ke arah radial ( $\Delta x_y$ ) yang semakin besar akan meningkatkan nilai ketinggian kerah hasil proses IBHF.
3. Nilai besar langkah pembentukan ke arah aksial ( $\Delta z$ ) yang semakin besar akan menurunkan nilai ketinggian kerah pada proses IBHF.

#### **5.2 Saran**

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian dengan rentang kecepatan makan ( $v_f$ ) yang lebih tinggi agar pengaruhnya dapat diidentifikasi.
2. Melakukan penelitian dengan menggunakan material yang umumnya digunakan pada industri otomotif.
3. Menambahkan parameter respon *strain hardening* pada setiap kombinasi eksperimen.

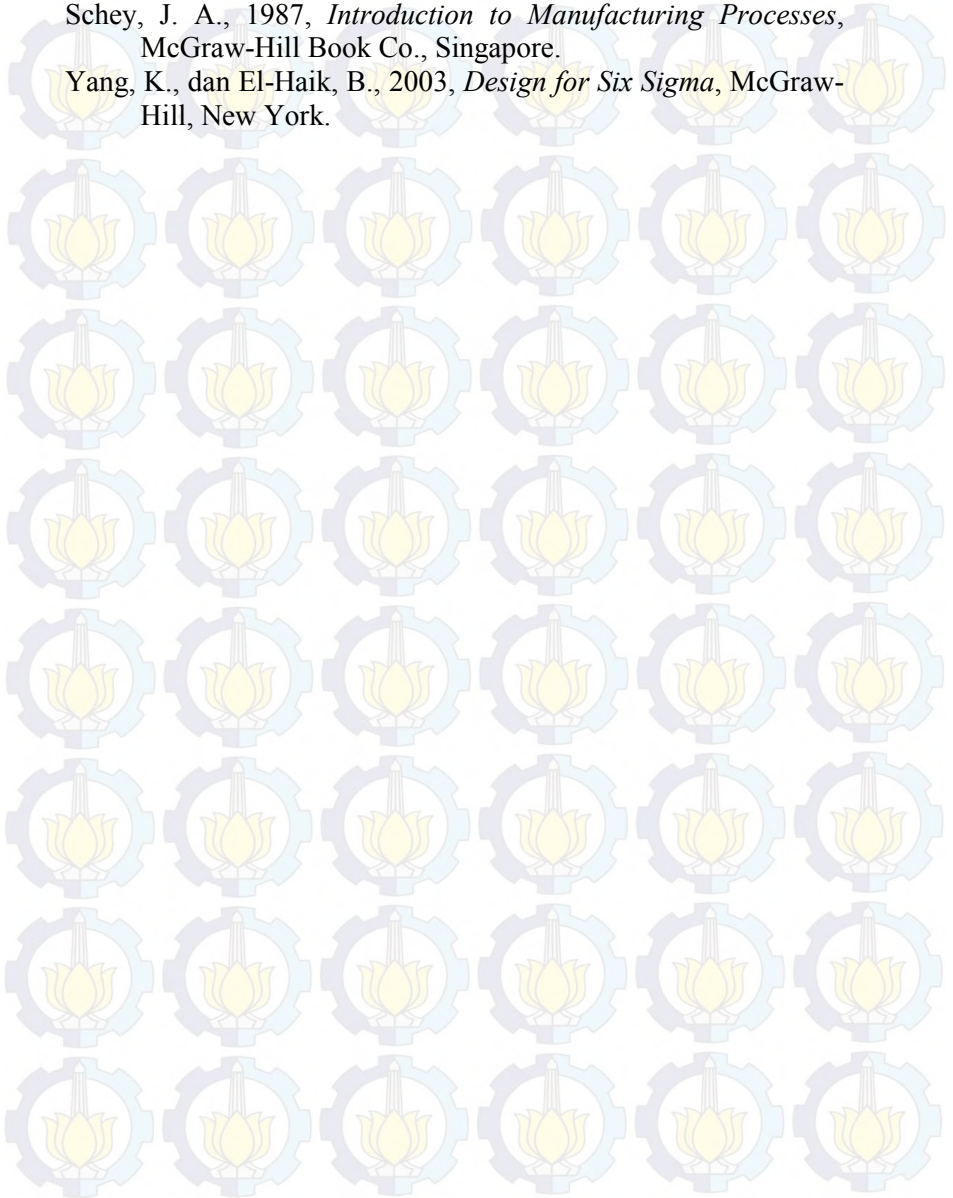
## DAFTAR PUSTAKA

- ASM Handbook, 2006, Volume 14B, Metalworking: Sheet Forming (#05120).
- Bhattacharyya, G. K., dan Johnson, R. A., (1997), *Statistical Concepts and Methods*, John Wiley & Sons, Canada.
- DeGarmo, E. P., J. T. Black, dan R. A. Kohser, (1997), *Materials and Processes in Manufacturing*, Willey, 10th edition
- Huang, Y., dan Chien, K., *Influence of the punch profile on the limitation of formability in the hole-flanging process*, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, Volume 113, Issues 1–3, 15 June 2001, Pages 720–72.
- Iriawan, N., dan Astuti, S. P., (2006), Mengolah Data Statistik dengan Mudah Menggunakan Minitab 14, Edisi I, Andi Offset, Yogyakarta.
- Kalpakjian, S., dan Steven, R. S., (2009), *Manufacturing Engineering and Technology*, Prentice Hall, New Jersey.
- Kim, Y. H., dan Park, J. J., *Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal*. Journal of Materials Processing Technology 130–131 (2002) 42–46.
- Kolarik, W. J., 1995, *Creating Quality Concepts, Systems, and Tools*, McGraw-Hill, Singapore.
- Kopac, J., dan Kampus, Z., 2005 *Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool*.
- Krichen, A., A. Kacem, dan M. Hbaieb, *Blank-holding effect on the hole flanging process of sheet aluminum alloy*, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, Volume 211, Issue 4, 1 April 2011, Pages 619–626.
- Lange, K., 1985, *Handbook of Metal Forming*, Society of Manufacturing Engineer, Dearborn, Michigan, USA.
- Montgomery, D. C., 1991, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Singapore.
- Petek, A., dan Kuzman, K., *Backward Hole-Flanging Technology Using an Incremental Approach*, Journal of Mechanical Engineering 58(2012)2, 73-80, 2012.



Schey, J. A., 1987, *Introduction to Manufacturing Processes*, McGraw-Hill Book Co., Singapore.

Yang, K., dan El-Haik, B., 2003, *Design for Six Sigma*, McGraw-Hill, New York.



## LAMPIRAN 1

Tabel L-1 Data hasil pengukuran ketinggian kerah replikasi pertama hasil proses IBHF

No.	replikasi	$v_f$	$\Delta x_y$	$\Delta z$	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata
1	1	400	1.00	2.00	7.10	7.07	7.02	7.05	7.06
2		400	1.00	2.75	6.85	7.01	6.91	6.94	6.93
3		400	1.00	3.50	6.64	6.87	7.06	6.95	6.88
4		400	1.25	2.00	7.04	7.00	7.33	7.40	7.19
5		400	1.25	2.75	7.05	6.93	7.14	6.95	7.02
6		400	1.25	3.50	7.08	7.03	6.91	6.90	6.98
7		400	2.00	2.00	7.33	7.41	7.55	7.56	7.46
8		400	2.00	2.75	7.63	7.22	7.31	7.32	7.37
9		400	2.00	3.50	7.05	7.18	7.44	7.12	7.20
10		700	1.00	2.00	6.97	7.01	7.11	7.03	7.03
11		700	1.00	2.75	7.18	7.04	7.09	6.82	7.03
12		700	1.00	3.50	6.94	6.97	6.83	6.85	6.90
13		700	1.25	2.00	7.20	7.04	7.25	7.27	7.19
14		700	1.25	2.75	7.04	7.11	6.90	7.12	7.04
15		700	1.25	3.50	6.72	7.00	7.00	7.03	6.94
16		700	2.00	2.00	7.37	7.37	7.46	7.45	7.41
17		700	2.00	2.75	7.17	7.31	7.40	7.60	7.37
18		700	2.00	3.50	7.22	7.25	7.27	7.33	7.27

## LAMPIRAN 2

Tabel L-2 Data hasil pengukuran ketinggian kerah replikasi kedua hasil proses IBHF

No.	replikasi	$v_f$	$\Delta^x/y$	$\Delta z$	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata
1	2	400	1.00	2.00	7.13	7.14	7.03	6.95	7.06
2		400	1.00	2.75	7.25	7.01	7.18	6.74	7.04
3		400	1.00	3.50	7.01	6.99	6.55	6.77	6.83
4		400	1.25	2.00	7.12	7.02	7.28	7.32	7.19
5		400	1.25	2.75	6.85	7.05	7.12	6.93	6.99
6		400	1.25	3.50	7.04	7.04	6.74	6.96	6.94
7		400	2.00	2.00	7.39	7.34	7.35	7.49	7.39
8		400	2.00	2.75	7.20	7.34	7.24	7.56	7.34
9		400	2.00	3.50	7.06	7.38	7.05	7.21	7.17
10		700	1.00	2.00	7.07	7.03	7.04	7.31	7.11
11		700	1.00	2.75	6.92	7.14	6.93	6.96	6.99
12		700	1.00	3.50	6.84	6.97	6.92	6.86	6.90
13		700	1.25	2.00	7.20	7.18	7.04	7.09	7.13
14		700	1.25	2.75	6.94	6.97	7.09	6.94	6.99
15		700	1.25	3.50	6.99	6.86	6.89	7.07	6.95
16		700	2.00	2.00	7.38	7.35	7.43	7.52	7.42
17		700	2.00	2.75	7.15	7.20	7.13	7.38	7.21
18		700	2.00	3.50	7.13	6.98	7.10	7.24	7.11



### LAMPIRAN 3

Tabel L-3 Data hasil pengukuran ketebalan replikasi pertama kerah hasil proses IBHF

No.	replikasi	$v_f$	$\Delta\%_y$	$\Delta z$	t1	t2	t3	t4	Rata-rata
1	1	400	1.00	2.00	0.7	0.72	0.73	0.71	0.72
2		400	1.00	2.75	0.79	0.7	0.71	0.72	0.73
3		400	1.00	3.50	0.81	0.74	0.7	0.7	0.74
4		400	1.25	2.00	0.72	0.71	0.72	0.72	0.72
5		400	1.25	2.75	0.73	0.73	0.72	0.7	0.72
6		400	1.25	3.50	0.74	0.74	0.72	0.72	0.73
7		400	2.00	2.00	0.62	0.62	0.6	0.62	0.62
8		400	2.00	2.75	0.65	0.66	0.65	0.65	0.65
9		400	2.00	3.50	0.68	0.67	0.69	0.66	0.68
10		700	1.00	2.00	0.69	0.69	0.69	0.71	0.70
11		700	1.00	2.75	0.69	0.72	0.7	0.7	0.70
12		700	1.00	3.50	0.72	0.73	0.73	0.68	0.72
13		700	1.25	2.00	0.7	0.7	0.72	0.72	0.71
14		700	1.25	2.75	0.71	0.72	0.72	0.71	0.72
15		700	1.25	3.50	0.71	0.72	0.73	0.72	0.72
16		700	2.00	2.00	0.63	0.62	0.63	0.6	0.62
17		700	2.00	2.75	0.67	0.64	0.63	0.65	0.65
18		700	2.00	3.50	0.66	0.67	0.66	0.68	0.67

#### LAMPIRAN 4

Tabel L-4 Data hasil pengukuran ketebalan kerah replikasi kedua hasil proses IBHF

No.	replikasi	$v_r$	$\Delta\%_y$	$\Delta z$	t1	t2	t3	t4	Rata-rata
1	2	400	1.00	2.00	0.7	0.7	0.7	0.71	0.70
2		400	1.00	2.75	0.73	0.75	0.72	0.72	0.73
3		400	1.00	3.50	0.71	0.74	0.8	0.7	0.74
4		400	1.25	2.00	0.71	0.7	0.71	0.71	0.71
5		400	1.25	2.75	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
6		400	1.25	3.50	0.75	0.72	0.72	0.74	0.73
7		400	2.00	2.00	0.63	0.63	0.61	0.6	0.62
8		400	2.00	2.75	0.65	0.65	0.64	0.64	0.65
9		400	2.00	3.50	0.69	0.69	0.66	0.68	0.68
10		700	1.00	2.00	0.68	0.7	0.7	0.69	0.69
11		700	1.00	2.75	0.71	0.72	0.7	0.7	0.71
12		700	1.00	3.50	0.72	0.76	0.7	0.74	0.73
13		700	1.25	2.00	0.71	0.71	0.71	0.7	0.71
14		700	1.25	2.75	0.72	0.72	0.72	0.71	0.72
15		700	1.25	3.50	0.72	0.72	0.72	0.74	0.73
16		700	2.00	2.00	0.63	0.65	0.61	0.6	0.62
17		700	2.00	2.75	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64
18		700	2.00	3.50	0.69	0.65	0.67	0.65	0.67

## LAMPIRAN 5

### General Linear Model: Rm versus Vf, $\Delta x/y$ , $\Delta z$

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Vf	Fixed	2	400, 700
$\Delta x/y$	Fixed	3	1.00, 1.25, 2.00
$\Delta z$	Fixed	3	2.00, 2.75, 3.50

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vf	1	0.000042	0.01%	0.000042	0.000042	0.05	0.828
$\Delta x/y$	2	0.368189	71.27%	0.368189	0.184095	217.19	0.000
$\Delta z$	2	0.138194	26.75%	0.138194	0.069097	81.52	0.000
Error	12	0.010172	1.97%	0.010172	0.000848		
Total	17	0.516597	100.00%				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0.0291140	98.03%	97.21%	0.0228859	95.57%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	7.11208	0.00686	( 7.09713, 7.12703)	1036.41	0.000	
Vf						
400	0.00153	0.00686	(-0.01342, 0.01648)	0.22	0.828	1.00
$\Delta x/y$						
1.00	-0.13188	0.00970	(-0.15302, -0.11073)	-13.59	0.000	1.33
1.25	-0.06687	0.00970	(-0.08802, -0.04573)	-6.89	0.000	1.33
$\Delta z$						
2.00	-0.10854	0.00970	( 0.08740, 0.12969)	11.18	0.000	1.33
2.75	-0.00250	0.00970	(-0.02364, 0.01864)	-0.26	0.801	1.33

Regression Equation

$$\begin{aligned} Rm = & 7.11208 + 0.00153 \text{ Vf}_{400} - 0.00153 \text{ Vf}_{700} - 0.13188 \Delta x/y_{1.00} \\ & - 0.06687 \Delta x/y_{1.25} \\ & + 0.19875 \Delta x/y_{2.00} + 0.10854 \Delta z_{2.00} - 0.00250 \Delta z_{2.75} - 0.10604 \Delta z_{3.50} \end{aligned}$$



## LAMPIRAN 6

Tabel L-5 Hasil uji tarik

Y. Chen et al. / International Journal of Solids and Structures 46 (2009) 3825–3835

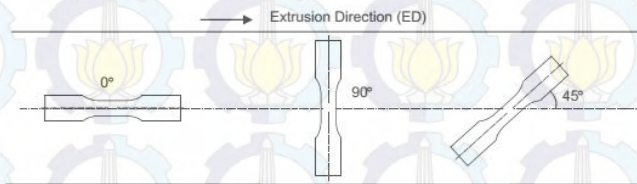



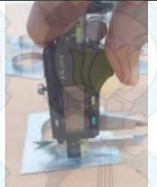
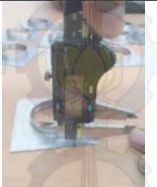



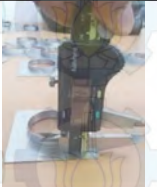
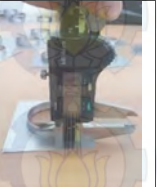





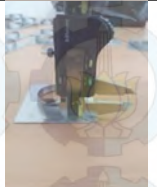
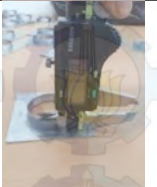




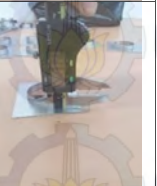

Fig. 1. Orientation of test specimens with respect to the extrusion direction of the flat profile.

UJI TARIK 0°					
LEBAR (Mm)	TEBAL (Mm)	GAYA MAKSIMUM (N)	TEGANGAN SAAT LULUH (N/Mm2)	TEGANGAN YIELD (N/Mm2)	% ELONGATION
12.5	1	943.4	116.4	77.2	32%
UJI TARIK 45°					
LEBAR (Mm)	TEBAL (Mm)	GAYA MAKSIMUM (N)	TEGANGAN SAAT LULUH (N/Mm2)	TEGANGAN YIELD (N/Mm2)	% ELONGATION
12.5	1	917.7	122.6	78.6	30%
UJI TARIK 90°					
LEBAR (Mm)	TEBAL (Mm)	GAYA MAKSIMUM (N)	TEGANGAN SAAT LULUH (N/Mm2)	TEGANGAN YIELD (N/Mm2)	% ELONGATION
12.5	1	897.6	126.3	81.9	29%

Tabel L-3 Data pengukuran benda kerja hasil proses IBHF pada tiap sisi

No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
1					7.06
2					6.93
3					6.88
4					7.19
5					7.02

Tabel L-3 Data pengukuran benda kerja hasil proses IBHF pada tiap sisi (lanjutan)

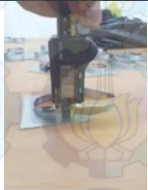
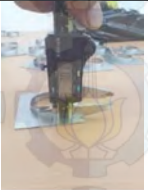
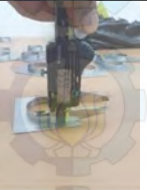
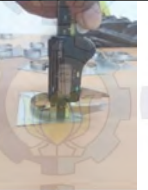

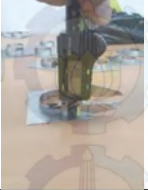
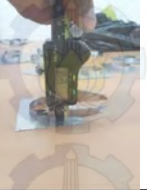
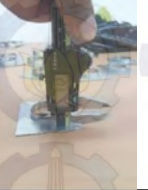
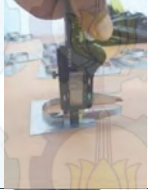
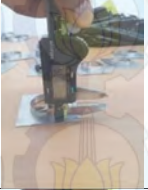
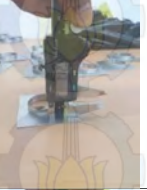
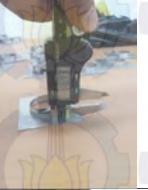
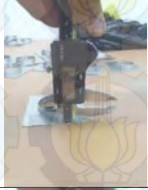





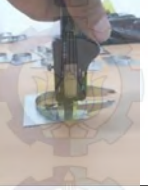
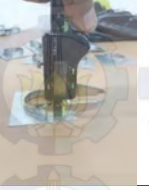
No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
6					6.98
7					7.46
8					7.37
9					7.20
10					7.03



Tabel L-3 Data pengukuran benda kerja hasil proses IBHF pada tiap sisi (lanjutan)

No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
11					7.03
12					6.90
13					7.19
14					7.04
15					6.94

Tabel L-3 Data pengukuran benda kerja hasil proses IBHF pada tiap sisi (lanjutan)

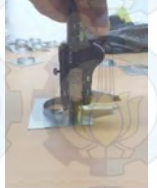
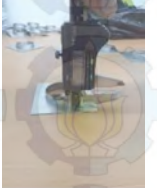

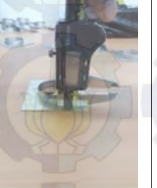


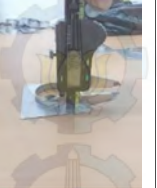

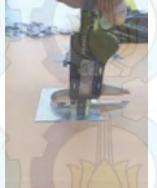
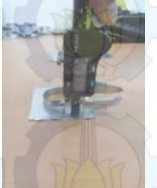
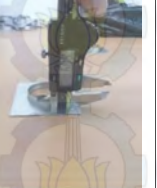
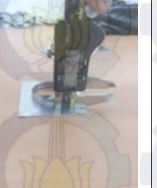
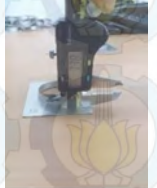



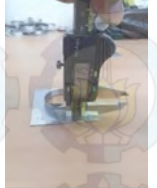
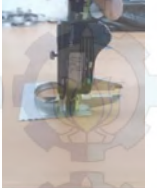
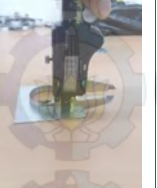
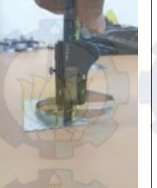
No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
21					6.83
22					7.19
23					6.99
24					6.94
25					7.39

Tabel L-3 Data pengukuran benda kerja hasil proses IBHF pada tiap sisi (lanjutan)

No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
26					7.34
27					7.17
28					7.11
29					6.99
30					6.90



Tabel L-3 Data pengukuran benda kerja hasil proses IBHF pada tiap sisi (lanjutan)

No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
31					7.13
32					6.99
33					6.95
34					7.42
35					7.21

Tabel L-3 Data pengukuran benda kerja hasil proses IBHF pada tiap sisi (lanjutan)

No.	h 1	h 2	h 3	h 4	Rata-rata (mm)
36					7.11

## BIODATA PENULIS



Muhammad Fakhruddin, dilahirkan di kota Malang pada tanggal 11 Desember 1991. Penulis adalah anak kedua dari tiga bersaudara dan lahir dari pasangan Bapak Imam Mashudi dan Ibu Yetti Indrawati. Pendidikan dasar ditempuh di Madrasah Ibtidai'yah Negeri I Malang. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di Madrasah Tsanawiyah Negeri I Malang. Pendidikan sekolah menengah atas ditempuh di SMA Negeri 8 Malang. Pada Tahun 2010-2013, penulis melanjutkan pendidikan D3 di Politeknik Negeri Malang, tepatnya di Jurusan Teknik Mesin konsentrasi Produksi. Penulis pernah melaksanakan praktek kerja lapangan selama 3 bulan di PT. AT Indonesia divisi *engineering*. Kemudian pada tahun 2014, penulis melanjutkan jenjang studi S1 di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember sebagai mahasiswa lintas jalur angkatan 2013 semester genap. Penulis aktif di dalam lingkungan Laboratorium Proses Manufaktur. Saat ini penulis mempunyai keinginan untuk mengembangkan hasil dari Tugas Akhirnya menjadi penelitian-penelitian lanjut di bidang proses manufaktur dan pembentukan.